

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



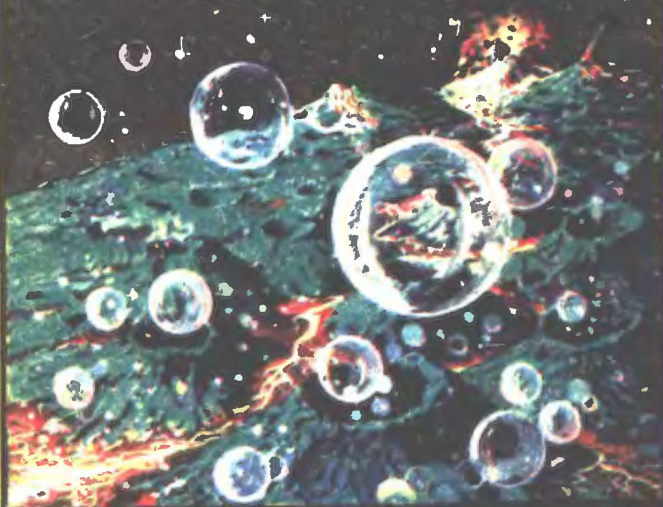
ПЕРЕВОДНАЯ НАУЧНО ПОПУЛЯРНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Издательство
Знание

Минору Озима

ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ

Происхождение Земли и ее атмосферы,
возникновение ядра и мантии, дрейф континентов
все это было недавно для нас
лишь загадкой



小嶋 稔 著

地球史

小 嶋 稔 著

地 球 史

岩 波 新 書

Минору Озима

ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ

*Перевод
с японского
Н. И. Жукова*

*Издательство „Знание“
Москва 1983*

ББК 26.323

046

Под редакцией кандидата геолого-минералогических наук **Л. Я. АРАНОВИЧА**

Предисловие доктора физико-математических наук **В. С. САФРОНОВА** и кандидата физико-математических наук **А. В. ВИТЯЗЕВА**

Озима М.

046 История Земли. Пер. с япон.— М.: Знание, 1983.— 205 с., ил.

35 к.

50 000 экз.

До недавнего времени мало что знали о ранних этапах существования Земли: об образовании ее магнитного поля, о расслоении недр планеты на ядро и мантию, о происхождении атмосферы, гидросферы и земной коры и, наконец, о зарождении жизни. Огромный период, охватывающий около $\frac{3}{4}$ всей истории Земли, оставался загадочным и недоступным, пока не возникла новая научная дисциплина — изотопная геохронология. В этой книге, написанной видным специалистом в области изотопной геохронологии профессором Токийского университета М. Озимой, делается попытка осветить целиком всю 4,5-миллиардную историю нашей планеты.

Книга рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся современными проблемами естествознания.

О 1904040000—035 71—83
073(02)—83

ББК 26.323
552

1979 年 1 月 22 日 第 1 刷発行 ©
1979 年 3 月 15 日 第 2 刷発行

© Перевод на русский язык,
предисловие и примечания.
Издательство «Знание», 1983 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к книге М. Озимы «История Земли»	6
ГЛАВА I Движущая сила в эволюции Земли	17
ГЛАВА II Зарождение Земли	35
ГЛАВА III Как произошло расслоение Земли	64
ГЛАВА IV Эволюция мантии	85
ГЛАВА V Хронологическая шкала истории Земли	98
ГЛАВА VI Эволюция земной коры	114
ГЛАВА VII Происхождение атмосферы и гидро- сферы	155
ГЛАВА VIII Связь прошлого с настоящим и бу- дущим нашей планеты	187
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	202

Предисловие к книге
М. Озимы
«История Земли»

История нашей планеты еще полна неразгаданных тайн. Но лик Земли был достаточно хорошо известен уже к концу эпохи Великих географических открытий. За первопроходцами, а иногда и вместе с ними, шли геологи. Находки окаменевших остатков фауны и флоры древнейших эпох вели исследователей все дальше в глубь времен. Становилось ясным, что в смене этих эпох огромная роль принадлежит мощным процессам в недрах планеты, и сегодня напоминающим о себе вулканами и землетрясениями.

К началу нашего века большой популярностью пользовалась концепция об огненно-жидком состоянии первичной Земли. Казалось естественным, что остывание и сжатие планеты должны вести к складкообразованию на ее поверхности и появлению величественных горных хребтов. Были и возражения. Основная критика этой гипотезы началась после открытия радиоактивных элементов и установления важности нагрева земных недр вследствие распада урана и тория. Однако данных, собираемых лишь на поверхности Земли, было явно недостаточно для разрешения спора.

Геодезические и гравиметрические измерения, первые шаги сейсмологии открыли эпоху геофизических исследований земного шара. Установление слоистого строения Земли, определение границ ядра и мантии, выявление разных типов коры показали мощь геофизических методов исследования. С развитием минералогии и

петрологии, тонких методов химического анализа началось развитие геохимического направления. В 50-х годах совокупность накопленных данных заставила отказаться от гипотезы огненно-жидкой первичной Земли.

Большой вклад в развитие идей о холодной первичной Земле внесли наши ученые — академики В. И. Вернадский и О. Ю. Шмидт. О. Ю. Шмидт, основатель советской школы планетной космогонии, высказал ряд глубоких идей о происхождении и первичном состоянии Земли и обосновал важность комплексного подхода к изучению ее эволюции. В результате появления палеомагнитных методов исследования горных пород, измерений потоков тепла и газов из земных недр, становления океанологии и глобальной метеорологии возникла целая система наук о Земле.

С выходом в космос неизмеримо возросло количество данных о Земле и других телах Солнечной системы. Прошлые Земли стало частью более общей проблемы происхождения и эволюции планет Солнечной системы. С развитием физико-химических методов изотопной геохронологии в науках о Земле появилась уникальная возможность проверить гипотезы о существовании и длительности отдельных эволюционных стадий как в ходе развития Земли, так и на предшествующих этапах ее формирования в газопылевом облаке, вращавшемся около молодого Солнца.

Имя автора этой книги М. Озимы хорошо известно специалистам в области изотопной геохимии. Многие его идеи, касающиеся проблемы происхождения земной атмосферы и гидросферы путем дегазации из сформировавшейся Земли, представляют значительный интерес. Не все из них разделяются специалистами. Однако в ведущейся дискуссии к мнению М. Озимы, хорошо понимающего сложность экспериментальной работы с природными образцами, прислушиваются и его противники.

Теории эволюции Земли, то есть полного и непротиворечивого описания развития ядра и мантии Земли, океанической и континентальной коры, атмосферы, гидросферы и биосферы, пока еще не существует. Имеется несколько направлений и школ, возглавляемых ведущими специалистами в области геофизики, геохимии и геологии. Сложность возникающих проблем, неоднозначность трактовки уже добытых фактов пока не позволяют соединить в единой картине данные, полученные при различных подходах.

Книга М. Озимы «История Земли» посвящена в основном изложению позиции автора и является как бы серией очерков, объединенных общей идеей о взаимосвязи развития отдельных оболочек Земли и о взаимодействии методов исследования их состояния и эволюции. Далеко не всем идеям и фактам, имеющимся в распоряжении наук о Земле, уделено так много места, как наиболее близким автору методам и результатам изотопной геохронологии. Однако живой и увлекательный рассказ о них, как бы приглашающий читателя в творческую лабораторию ученого, будет, несомненно, с интересом воспринят широким кругом читателей.

Необычен и способ подачи материала. Автор отказался от исторического, хронологического изложения в описании стадий развития Земли. К некоторым вопросам М. Озима возвращается в следующих разделах, освещая их под другим углом. Встречающиеся повторы не утомительны и позволяют увидеть вопрос с новой стороны, в окружении новых факторов, последовательное перечисление которых в одном месте могло бы иногда вызывать скуку. В ряде глав автор шел на сознательное упрощение сути вопроса.

В книге не нашлось также места многим новым фактам, волнующим сейчас специалистов. Не всегда упоминаются идеи, не разделяемые автором. Чтобы читатель

мог полнее ознакомиться с такими вопросами, в конце этого предисловия перечислена дополнительная литература. К сожалению, в книге М. Озимы почти не нашли отражения многие результаты советских авторов. Не отмечена важность идей академика В. И. Вернадского, предвосхитившего многие из современных геохимических и космохимических подходов, работы академика А. П. Виноградова и его сотрудников, результаты советских космических экспедиций на Луну и Венеру.

Однако все это никак не умаляет достоинства книги, тем более что при необходимости текст сопровождается соответствующими примечаниями о вкладе советских ученых. Кроме того, теория происхождения и развития Земли еще не закончена, в связи с чем весьма полезным является знакомство с результатами, полученными учеными разных направлений и школ. Это понимают все специалисты, в том числе и автор книги, который уже после ее написания, осенью 1981 года, побывал в Советском Союзе и выступил с докладом в Институте геохимии и аналитической химии АН СССР им. В. И. Вернадского в Москве.

Зародившаяся на наших глазах новая дисциплина, сравнительная планетология, помогает глубже понять общие принципы развития планет Солнечной системы и в то же время уникальность нашей Земли. Ясно, что способ образования и начальное состояние планеты во многом определили ее последующее развитие. Работы Хаяши, о которых с таким уважением пишет М. Озима, развивают один из вариантов теории происхождения планет, основанной на идеях О. Ю. Шмидта. Поэтому стоит сказать более подробно о современном состоянии теории происхождения Земли и планет.

Предпочтительную модель происхождения Солнечной системы, не противоречащую известным в настоящее время фак-

тическим данным и объясняющую их наиболее естественным путем, можно кратко описать следующим образом. Солнце и планеты образовались в едином процессе в результате сжатия (коллапса) протосолнечной туманности, состоявшей на 98—99% из газа, обладавшей относительно медленным вращением и имевшей массу, лишь немного превышающую массу Солнца.

При сжатии протосолнечной туманности сначала образовалось более плотное горячее ядро. Затем вследствие неустойчивости на краю ядра, в его экваториальной плоскости, отделилось небольшое количество вещества, из которого сформировалось уплотненное газопылевое облако — диск. Вещество, продолжавшее падать на диск, способствовало разрастанию диска до размеров, близких к размерам современной планетной системы. Ядро, от которого передавался вращательный момент, сжавшись, превратилось в Солнце. Согласно расчетам, проведенным учеными разных стран, эта стадия протекала в течение одного миллиона лет.

В возникшем допланетном диске пылевые частицы опускались сквозь газ к центральной плоскости, образовав обогащенный пылью слой. Было показано, что такой слой гравитационно неустойчив и должен распасться на множество пылевых сгущений. Объединяясь при столкновениях, сгущения сжимались и превращались в сплошные твердые тела поперечником порядка 10 километров в зоне планет земной группы. Продолжительность этой стадии была не более ста тысяч лет.

Далее последовала более длительная эволюция роя допланетных тел. Относительные скорости тел определялись их гравитационными возмущениями при сближениях и первоначально были малы. Тела при столкновениях преимущественно объединялись. При этом скорости тел, согласно расчетам, росли пропорционально радиусу

крупнейших тел. Когда последние достигли размеров Луны, скорости увеличивались почти до одного километра в секунду и тела стали дробиться при соударениях. Большие тела своим тяготением удерживали осколки и продолжали расти, присоединяя к себе другие. Так возник широкий спектр размеров — от характерных для крупных тел до свойственных малым частицам.

Эти результаты теоретических исследований подтверждаются данными о распределении тел в поясе астероидов и статистикой кратеров на Луне, Меркурии, у отдельных спутников Юпитера, поверхность которых еще сохраняет память о заключительных этапах аккумуляции. Самые крупные тела росли относительно быстрее других и стали зародышами будущих планет. Они эффективно поглощали вещество, оказывавшееся на их пути. При этом расширялись их зоны питания и гравитационного влияния, им становилось тесно, и меньшие из них превращались из поглощающих в поглощаемые.

К концу этого процесса осталось всего лишь 9 больших планет, отстоящих одна от другой на таких расстояниях, что их движение оставалось устойчивым на протяжении миллиардов лет. В зоне Земли процесс аккумуляции тел в планету длился около 100 миллионов лет. Под действием корпускулярного «ветра» и коротковолнового излучения молодого Солнца газ из зоны Земли был удален за время около 10 миллионов лет, поэтому заключительная стадия ее роста протекала, по-видимому, в отсутствие газа. Но в зонах Юпитера и Сатурна газ задерживался дольше, и достаточно массивные твердые ядра этих планет (согласно оценкам разных авторов, начальные массы этих ядер были порядка 3—5 масс Земли) присоединяли к себе оставшийся газ.

Образование малых тел Солнечной системы явилось побочным продуктом основ-

ного процесса образования планет. Во время аккумуляции планет вокруг некоторых из них образовались спутниковые рои — в результате захвата своим гравитационным полем частиц, подвергшихся неупругим столкновениям в их окрестностях. Аккумуляция спутников в этих роях протекала аналогично аккумуляции самих планет. В зонах планет-гигантов скорости тел были настолько большими, что часть тел была выброшена из Солнечной системы, а часть оказалась на далекой периферии, образовав так называемое кометное облако Оорта.

В зоне астероидов процесс формирования планеты был прерван более крупными телами, залетающими из зоны Юпитера. Сталкиваясь с астероидами, эти тела захватывали с собой преобладающую часть астероидов, а при сближении с оставшимися они увеличивали их относительные скорости своими гравитационными возмущениями. В результате столкновения между астероидами стали сопровождаться не объединением их, а дроблением.

Падающие на Землю метеориты являются преимущественно продуктами дробления астероидов. В ходе аккумуляции планет первичное вещество проходило сложную ударную переработку, и падающие сегодня метеориты несут на себе следы этого процесса. Разница в возрастах затвердевания метеоритов, измеряемая изотопными методами, составляет десятки миллионов лет, подтверждая шкалу времени аккумуляции, получающуюся при моделировании процесса на ЭВМ.

Основным фактором, определившим начальное состояние Земли, были размеры тел, из которых она формировалась. Чем крупнее были падавшие тела, тем эффективнее они нагревали Землю. Расчеты показали, что начальная температура центральных областей Земли составляла около 1500 К, то есть была в несколько раз ниже температур плавления для этих глу-

бин. Но по мере роста Земли верхняя ее оболочка нагревалась сильнее, и температура на глубинах 100—1000 километров могла приближаться к температуре плавления. Разрушение падавших тел приводило к выделению воды и газов, составивших первичные атмосферу и гидросферу. Наиболее крупные тела, упавшие на Землю, создали в ней значительные термические и химические неоднородности, простиравшиеся на тысячи километров, несомненно, оказав существенное влияние на характер ранней эволюции.

В работах школы Хаяши процесс образования планет тоже моделируется на основе идеи об их аккумуляции из твердых тел и частиц. Отличие же состоит в следующем. Японские ученые полагают, что в течение всего процесса роста Земля оставалась окруженной газом первичной туманности, который, по их мнению, улетучился значительно позднее. Они нашли, что при таких условиях и начальное состояние Земли должно быть совсем другим — вокруг нее должна была образоваться мощная (в 2000 раз массивнее современной) непрозрачная первичная атмосфера, из-за которой температура поверхности Земли на этой стадии должна была превышать 4000 К.

При этом возникают значительные трудности с последующим «удалением» такой гигантской атмосферы с помощью солнечного ветра или ультрафиолетового излучения Солнца. Японские ученые полагают, что эта первичная атмосфера была удалена в первые 500 миллионов лет жизни Земли.

Однако недавние наблюдения молодых звезд солнечного спектрального класса указывают, что необходимые интенсивности (на порядки большие современных) солнечного ветра и коротковолнового излучения присущи лишь самым ранним стадиям развития звезды — в первые десятки миллионов лет ее жизни. Образцы лунного

реголита, хранящие память о первых миллиардах лет Солнечной системы, также свидетельствуют лишь о пятикратном увеличении мощности солнечного ветра в ту эпоху.

Таким образом, идея массивной атмосферы на Земле не поддерживается современными астрофизическими данными. Неясно также, как согласовать столь высокую температуру Земли, получающуюся в такой модели, с данными наук о Земле. Как указывают исследования, проведенные членом-корреспондентом АН СССР А. И. Тугариновым, вряд ли можно сомневаться в существовании водных бассейнов (хотя бы и не столь обширных, как сейчас) уже в первые сотни миллионов лет жизни Земли.

Современное состояние теории происхождения планет Солнечной системы подробно освещено в ряде последних обзоров: Происхождение Солнечной системы (М., Мир, 1976); Сафронов В. С. Современное состояние теории происхождения Земли (Изв. АН СССР, Сер. физика Земли, № 6, 1982); Сафронов В. С., Витязев А. В. Происхождение Солнечной системы (М., ВИНТИ, 1982). В них можно найти более детальные сведения о вероятном строении первичной Земли и ранней стадии ее эволюции.

Из недавних советских публикаций, посвященных эволюции земных оболочек, необходимо отметить книгу члена-корреспондента АН СССР А. С. Мокина, имеющую то же название — «История Земли» (Л., Наука, 1979), в ряде аспектов более полно описывающую систему фактов, гипотез и теорий, связанных с современными представлениями об эволюции Земли.

Читатель, ознакомившийся с этими работами, увидит, что многие факты еще трактуются по-разному, ряд основных проблем пока далек от окончательного решения. До сих пор идет спор о времени возникновения ядра Земли, способе его

формирования. Не вполне ясны вопросы о составе и мощности первичных атмосферы и гидросферы, их эволюции, со временем, связи коры материков, формирующейся на протяжении миллиардов лет, со значительно более молодой океанической корой.

Необходимость прогресса в разрешении этих вопросов диктуется и некоторыми практическими потребностями. Так, например, М. Озима как одно из практических следствий результатов, полученных при исследованиях океанического дна, выделил проблему захоронения радиоактивных отходов атомной энергетики. Однако хотя сама по себе это и очень важная задача, но вариант захоронения радиоактивных отходов в глубинах океана, не подвластных оперативному вмешательству человека, чреват опасностью заражения окружающей среды. Известны опыты с металлическими контейнерами, быстро разрушающимися в активной водной среде, инциденты с внезапным и неконтролируемым распространением радиоизотопов при случайной утечке.

Все это говорит против поспешных выводов и рекомендаций и еще раз напоминает о необходимости комплексного подхода к данной проблеме.

На очереди стоят и другие практические задачи, воплощение в жизнь которых вряд ли мыслимо без существенного прогресса в решении фундаментальных проблем наук о Земле. Знание движущих сил тектонических процессов будет способствовать более уверенному прогнозу, а может быть, и предотвращению землетрясений. Поиск полезных ископаемых нуждается в более полной теории эволюции верхних оболочек Земли. Без понимания общих закономерностей формирования климата сложно оценить последствия вмешательства человека в окружающий ландшафт, водную и воздушную оболочки нашей планеты.

Ввиду сложности перечисленных проблем трудно ожидать их решения уже в ближайшие годы. Без сомнения, что для этого требуется широкое обсуждение их специалистами разных направлений и школ. Можно надеяться, что геологи, геохимики и геофизики с интересом прочтут «Историю Земли» М. Озимы. В еще большей степени книга будет полезна молодым читателям, выбирающим или осваивающим профессию в сфере наук о Земле. Перевод этой книги на русский язык — один из важных шагов в продолжении конструктивного диалога между всеми интересующимися прошлым, настоящим и будущим нашей планеты.

В. С. САФОНОВ,
А. В. ВИТЯЗЕВ.

ГЛАВА I

ДВИЖУЩАЯ СИЛА В ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

Энергия, таящаяся в горных породах

Одной из наиболее часто встречающихся на поверхности Земли горных пород является гранит. Этот хорошо всем известный камень широко используется в качестве отличного строительного материала. Но что с ним станет, если взять один его кусочек и поместить в небольшой, герметически закрытый сосуд?

Допустим, что сосуд выполнен из идеального теплоизолирующего материала, чтобы ни внутреннее тепло не могло выйти из сосуда, ни внешнее попасть в него снаружи.

Какие же изменения будут происходить внутри сосуда с течением времени?

Через один-два года мы даже при тщательном исследовании вряд ли обнаружим какие-либо перемены. Однако если провести подробное исследование внутренней части сосуда спустя 100 или 1000 лет, то при внимательном наблюдении можно будет обнаружить слабое повышение температуры. Через 100—200 тысяч лет это повышение станет совершенно очевидным. А тепла, выделенного гранитом в рассматриваемом сосуде за несколько десятков миллионов лет, окажется достаточным, чтобы полностью расплавить этот гранит.

Откуда же берется такое количество энергии в самом обычном на первый взгляд камне?

Дело в том, что в граните, хоть и в очень небольших количествах, содержатся уран, торий и другие радиоактивные элементы. Именно они-то и являются источником этой энергии. Урана в граните обычно содержится несколько десятитысячных долей процента, тория — около одной тысячной процента.

В результате своего радиоактивного распада ядра этих элементов в конечном итоге превращаются в ядра стабильных элементов, таких, как свинец. Период полураспада урана и тория (то есть промежуток времени, за который число атомов урана и тория уменьшается вдвое.— *Прим. ред.*) очень велик — от нескольких сот миллионов до нескольких миллиардов лет.

При радиоактивном распаде атомные ядра, разрушаясь, испускают альфа-частицы, электроны и другие частицы, обладающие высокими скоростями. Однако, несмотря на большую начальную скорость, частицы, пройдя в кристаллах минералов путь всего в несколько микрометров, останавливаются, сталкиваясь с атомами. При этом энергия движения частиц полностью превращается в тепло, которое поглощается кристаллами минералов.

Именно это тепло как раз и приводит к плавлению гранита, помещенного в герметически закрытый сосуд.

Помимо урана и тория, важную роль среди радиоактивных элементов, входящих в состав горных пород, играет калий, а точнее, его радиоактивный изотоп калий-40, который с периодом полураспада 1,25 миллиарда лет превращается в аргон-40 и кальций-40. Хотя доля радиоактивного калия-40 в составе при-

родного калия (то есть содержащегося в породах Земли.— *Прим. ред.*) составляет 0,0117%, но в гранитах калий содержится в значительном количестве (до нескольких процентов), и изотоп калий-40 поэтому имеет важное значение как источник внутренней энергии.

Если подсчитать количество тепловой энергии, выделяемой за год радиоактивными элементами, содержащимися в обычном граните, оно составит около 0,000 01 калории на грамм вещества. В таких породах, как базальты, из которых сложены хорошо известные японцам Фудзияма, Хаконэ и другие вулканы, также содержатся уран, торий и калий, хотя в количестве, на порядок меньшем, чем в гранитах.

Для перидотитов, горных пород, редко встречаемых на поверхности Земли, но являющихся, как полагают ученые, главным составным элементом ее глубинной части — мантии, содержание радиоактивных элементов в несколько сот раз меньше значения, обычного для гранитов.

Если учесть все эти данные, количество тепла, выделяемого за год веществом Земли, в среднем составит очень маленькую величину — не более 0,000 000 05 калории на грамм вещества. Однако общее количество энергии, выделившееся за очень долгую историю Земли (4,5 миллиарда лет), составит весьма внушительную цифру.

Эта выделяющаяся при распаде радиоактивных элементов энергия является основной движущей силой на протяжении 4,5 миллиарда лет драматической истории Земли, «включая» взрывы вулканов, землетрясения, дрейф

континентов, представляя собой и причину и источник эволюции внутренней части Земли¹.

Определение возраста Земли

Всем, наверное, известно, что существование в природе радиоактивных элементов было открыто в конце XIX века супругами Кюри. Заинтересовавшись сообщением Беккереля о том, что урановая руда испускает загадочное излучение, они сумели получить большое количество природного урана из Иохимсталльского рудника в Чехословакии. Им удалось из этой руды выделить радий и полоний, образующиеся в процессе

¹ Указанный М. Озмой радиогенный источник энергии не является единственным. При современном рассмотрении эволюции Земли учитываются и начальная температура планеты, разогретой падающими телами, и энергия, выделившаяся при расслоении первичной квазигомогенной Земли на тяжелое ядро и более легкую мантию, и энергия химических реакций, и энергия приливов. Так, например, советский геофизик Е. Н. Люстрых считает, что вклад энергии дифференциации планеты на ядро и мантию в общий тепловой баланс Земли сравним с радиогенной энергией. Е. Л. Рускол и другие ученые указывают на большую роль, которую играет энергия приливного взаимодействия, поскольку, как полагают, Луна образовалась на расстоянии около 20 земных радиусов от планеты, а затем только отодвинулась на сегодняшнее расстояние (60 земных радиусов), затратив существенную энергию на приливную деформацию верхних слоев Земли. О. Л. Кусков и Н. И. Хитаров обращают внимание на энергию химических реакций как один из источников нагрева земных недр, а В. Ларин вообще считает эту энергию основной движущей силой на ранних стадиях эволюции нашей планеты.— *Прим. ред.*

распада природного урана. Эти радиоактивные элементы, в свою очередь, также распадаются, превращаясь в конце концов в свинец.

Когда французский ученый Беккерель открыл радиоактивное излучение, шел 1897 год. Почти в то же самое время, по другую сторону Ламанша, в Великобритании, в самом разгаре шел спор о возрасте Земли между известным физиком Уильямом Томпсоном и великим естествоиспытателем Чарлзом Дарвином.

Собственно говоря, возраст Земли был отправной точкой дискуссии, в которой центр тяжести в дальнейшем сместился к оценке тепловой энергии внутренних недр Земли.

Лорд Кельвин, а именно такой титул носил У. Томпсон, опубликовал в период с 1862 по 1899 год цикл работ, посвященных определению возраста Земли. Он предполагал, что во времена, когда Земля формировалась как планета, она находилась в расплавленно-жидком состоянии. Образовавшись при высокой температуре, наша планета затем начала остывать за счет излучения тепла с поверхности. Учитывая, кроме того, тепло, получаемое Землей от Солнца, а также тепло, выделяемое в результате трения при приливном взаимодействии между Землей и Луной, можно, пользуясь теорией теплопроводности, рассчитать время, требующееся на остывание Земли до современной температуры. Основываясь на таком расчете, Томпсон в своей знаменитой статье «Возраст Земли как места обитания жизни» писал, что возраст нашей планеты можно считать самым большим $20 \div 400$ миллионов лет.

Однако вывод о том, что возраст Земли не превышает нескольких сот миллионов лет, уже в то время являлся весьма трудноприемлемым для геологов. Уже тогда было известно, что в различных районах земного шара толща осадочных пород достигает мощности несколько километров. Скорость же накопления осадков в глубоководных областях океанов крайне мала и не превышает нескольких миллиметров за тысячу лет. Следовательно, чтобы образовалась толща осадочных пород мощностью в несколько километров, необходимо время, большее 1 миллиарда лет.

Чарлз Дарвин, выражая общее для геологов того времени чувство недоверия к результатам Томпсона, основанным на сугубо математических выкладках, написал по этому поводу в своем выдающемся труде «Происхождение видов»: «Лорд Кельвин заключает, что формирование земной коры началось не позднее 20 миллионов лет назад, но и не раньше, чем 400 миллионов лет назад, вероятнее всего $98 \div 200$ миллионов лет назад. Большая ширина этой оценки и использованные данные сами по себе вызывают чувство недоверия, указывая на то, что должен быть введен новый важный фактор... В действительности, рассматривая эволюцию животного мира, имевшую место с конца ледникового периода, можно прийти к выводу, что происшедшие изменения являются весьма незначительными и поэтому возникает мысль, не слишком ли короткий срок предлагается для того, чтобы вместить все многообразие эволюции, наблюдавшееся начиная с кембрийского периода».

Этим «новым фактором», существование которого с помощью своего гениального дара предвидения предсказывал Чарлз Дарвин, оказалась энергия радиоактивного распада²— явления, завесу таинственности над которым почти в то же самое время впервые приподняли Беккерель и супруги Кюри. В предложенной Томпсоном теории остывания Земли (или, иначе говоря, при определении им возраста Земли) энергия радиоактивного распада совершенно не учитывалась.

А ведь энергии, скрытой в радиоактивных элементах горных пород, достаточно, как мы помним, чтобы за несколько десятков миллионов лет полностью расплавить, например, кусок гранита, в котором они содержатся. Это означает, что если следовать Томпсону, то Земля после своего возникновения не только не будет остывать, но, напротив, должна разогреваться за счет энергии радиоактивного распада.

Конечно, это повышение температуры не может продолжаться до бесконечности. По мере истощения запасов радиоактивных элементов выделение тепла во внутренних частях планеты будет ослабевать, и когда-нибудь Земля, по-видимому, совершенно остынет.

В настоящее время мы пока не можем дать ответ на вопрос, находится ли Земля по-прежнему в процессе повышения температуры или он уже сменился остыванием. И будущее простого куска гранита может оказаться весьма символическим и навести на мысли, помогающие понять историю всей Земли.

² См. сноску на с. 20.

Уран и торий

Остановимся несколько подробнее на уране, тории и других так называемых долгоживущих радиоактивных элементах, играющих главную роль в земной истории.

Уран и торий, относящиеся к самым тяжелым элементам, располагаются в третьем столбце периодической системы Менделеева. Оба они при обычных условиях становятся положительными четырехвалентными ионами с ионным радиусом³ 0,085 нанометра (уран) и 0,094 нанометра (торий). Поскольку ионы урана и тория несут одинаковый электрический заряд и имеют очень близкие размеры, их химические свойства чрезвычайно схожи. Следовательно, в тех породах и минералах, где высока концентрация урана, торий тоже присутствует в повышенных количествах.

Отношение содержания урана к содержанию тория остается постоянным для различных пород и минералов. Однако в сильно-окислительной среде уран дает шестивалентный ион. Этот ион образует окисел U_2^{6+} , который, будучи легкорастворимым, вымывается из горных пород. Поскольку при этом из пород выносятся только уран, отношение содержания урана к содержанию тория сильно изменяется. Но все же за исключением этого случая уран и торий являются химически весьма схожими элементами.

³ Ионными радиусами называются характеристики размеров ионов, получаемые при помощи рентгеновского структурного анализа, микроволновой спектроскопии и т. д. Используются для оценки межъядерных расстояний в ионных кристаллах и молекулах.— *Прим. ред.*

Из-за большой валентности уран и торий включаются в состав кристаллической решетки минералов позже большинства других элементов. И наоборот, когда вулканические горные породы частично расплавляются, образуя магму, уран и торий первыми покидают кристаллическую решетку минералов, переходя в силикатный расплав (магму). Когда такая магма застывает, уран и торий входят в состав кристаллической решетки тех минералов, которые образуются на самой последней стадии процесса кристаллизации. Используя это обстоятельство, можно по типу породы оценить количество содержащихся в ней урана и тория.

Например, предсказать, что граниты, образующиеся на заключительных стадиях процесса кристаллизации магмы, будут обогащены ураном и торием.

Содержание радиоактивных элементов в горных породах

Калий, так же как уран и торий, встречается в больших количествах в гранитах (табл. 1), а его ионы имеют большой ионный радиус. Из табл. 1 также видно, что содержание и урана и тория может меняться в зависимости от типа пород на три порядка, тогда как отношение этих содержаний остается неизменным. Этот феномен, как мы знаем, является проявлением химического сходства урана и тория.

Отметим, что в строении Земли вдоль ее радиуса — от поверхности к центру — выделяются три основных слоя. Ближе всех к по-

Таблица 1

Среднее содержание урана, тория и калия
в различных породах

Породы	Уран, млн ⁻¹	Торий, млн ⁻¹	Калий, %
Гранит	3,0	12,0	3
Базальт	1,0	4,0	0,5
Перидотит	0,001	0,004	0,04
Песчанк	0,45	1,7	1,4
Глобоковод- ный ил	1,3	7	2,5

верхности Земли расположена земная кора, на долю которой приходится не более 0,4% всей массы планеты. Под ней находится мантия, составляющая около $\frac{2}{3}$ всей массы Земли. Под мантией, собственно в центре земного шара, размещается ядро.

Как полагают, средний химический состав коры близок к составу, характерному для смеси из гранитов и базальтов, взятых в отношении 1:3. Химический же состав мантий, по наиболее распространенным представлениям, близок к составу перидотитов. Если это действительно так, то из табл. 1 видно, что среднее содержание калия в земной коре должно составлять около 1%, а в мантии — 0,04%. А соответствующее содержание урана составляет 0,002% для коры и 0,000 000 1% для мантии. Пользуясь этими значениями, легко подсчитать, насколько кора обогащена ураном, торием и калием по сравнению с мантией.

Общее содержание радиоактивных элементов в Земле

Как уже говорилось, разогрев горных пород и всей Земли в целом происходил за счет энергии, выделяющейся при радиоактивном распаде ядер урана и тория. Кроме того; как мы знаем, такой энергии, если она полностью остается в горных породах (не рассеиваясь наружу), достаточно, чтобы за несколько десятков миллионов лет расплавить гранит.

Для дальнейшего рассмотрения нам необходимо прежде всего оценить общее количество урана, тория и других радиоактивных элементов на Земле. Породы, слагающие земную кору, составляют очень небольшую часть массы Земли. Они представлены почти полностью гранитами и базальтами, и концентрация радиоактивных элементов в них велика. Что касается мантии, то содержание радиоактивных элементов в ней хотя и меньше, чем в коре, но все-таки тоже достаточно велико.

В то же время ядро, как полагают, состоит в основном из твердого расплава железа и никеля (с 10—20%-ной примесью более легких элементов: кислорода, кремния и т. д.— *Прим. ред.*). Этот вывод сделан на основании данных о распространении сейсмических волн, порождаемых землетрясениями, а также исходя из величины средней плотности Земли. Последняя оказалась близка к соответствующей величине для железо-никелевых метеоритов.

Поскольку уран и торий в железо-никелевом сплаве почти не растворимы, то общее

количество этих радиоактивных элементов, составляющих источники тепла земных недр, можно приблизительно приравнять их количеству в коре и мантии.

Если воспользоваться табл. 1, то, учитывая это обстоятельство, можно рассчитать, что содержание урана и тория для всей Земли в целом составляет 0,000 001 %, или 1 грамм на 100 миллионов граммов вещества Земли. В табл. 2 показано количество тепловой энергии, выделяющееся за год при распаде наиболее распространенных в природе радиоактивных элементов. Отметим, что природный уран (то есть содержащийся в породах Земли) состоит из двух изотопов — урана-238 и урана-235 (вообще говоря, в природном уране еще содержится незначительное количество урана-239.— *Прим. ред.*). Причем соотношение количеств этих изотопов там удивительно постоянно: урана-238 в 137,8 раза больше урана-235.

Постоянство изотопного состава характерно для всех элементов в природе (исключая те изотопы, количество которых изменяется

Таблица 2

Количество тепла, выделяемое за год
при радиоактивном распаде (на грамм вещества)

Вещество	Тепловыделение, кал
Уран-238	0,71
Уран-235	4,3
Природный уран	0,73
Калий-40	0,21
Природный калий	$27 \cdot 10^{-6}$

в результате радиоактивного распада других элементов). Этот факт является очень важным условием при рассмотрении происхождения Земли и Солнечной системы, но эту тему мы оставим для следующей главы, а сейчас продолжим разговор о количестве тепла, выделяемого в недрах Земли.

Если оценивать количество тепла, выделяемого за год внутри нашей планеты, основываясь на сведениях о содержании радиоактивных элементов в Земле и на приведенных в табл. 2 данных о количестве выделяемого ими тепла, получится величина около 0,000 000 05 калории на грамм вещества. Это — современное значение, а если обратиться к прошлому, то количества выделявшегося тепла за год должно быть больше. Общее же количество тепловой энергии, выделившееся за всю историю Земли, охватывающую 4,5 миллиарда лет, как показывают оценки, должно превысить несколько сот калорий на грамм вещества.

Удельная теплоемкость горных пород при давлении в одну атмосферу составляет 0,1—0,2 калории на грамм, скрытая теплота плавления — примерно 100 калорий на грамм, а температура плавления — около 1500°C. Отсюда можно подсчитать, что, для того чтобы расплавить один грамм вещества пород, необходимо несколько сот калорий⁴. При более вы-

⁴ Эта удельная теплота плавления подсчитывается по формуле $Q = C_p(T - T_0) + \Delta Q$, где C_p — удельная теплоемкость; ΔQ — скрытая теплота плавления; T — температура плавления. Отсюда действительно получается, что при $T_0 = 0^\circ\text{C}$ и $C_p \approx 0,15$ калории на грамм $Q = 0,15 \times 1500 + 100 \approx 350$ калорий на грамм. — *Прим. ред.*

соких давлений, существующих во внутренних областях Земли, эта величина станет несколько больше, но вряд ли полученная оценка будет более чем на порядок отличаться от реального значения.

Таким образом, тепловая энергия, выделившаяся при радиоактивном распаде за 4,5 миллиарда лет истории Земли, примерно равна количеству тепла, необходимому, чтобы полностью расплавить всю Землю. Следовательно, если бы все тепло, образующееся за счет энергии радиоактивного распада, полностью скапливалось в недрах Земли, то за 4,5 миллиарда лет наша планета, вероятно, полностью бы расплавилась.

Выделение и перенос тепла земных недр

Однако сейчас, спустя 4,5 миллиарда лет, Земля, за исключением некоторой части ядра, находится в твердом состоянии⁵ (согласно данным сейсмологических исследований, внешняя значительная часть ядра находится в жидком состоянии). Следовательно, определенная часть внутреннего тепла Земли должна была рассеяться за ее пределы. Медленно распространяясь по горным породам, это тепло, поднимаясь вместе с магмой к земной поверхности, затем покидает Землю, уносясь вместе с вулканическими газами, вода-

⁵ Конечно, в жидком состоянии находятся все поверхностные и грунтовые воды Земли (включая океаны), а также магма, изливающаяся в областях вулканической активности. Однако их доля в общей массе планеты настолько незначительна, что ей можно пренебречь, говоря о Земле в целом.— *Прим. ред.*

ным паром и другими продуктами извержений.

Породы поверхностных слоев являются, образно говоря, ватным одеялом, укутывающим Землю и препятствующим потере тепла. По этой причине наблюдается повышение температуры при рассмотрении более глубоких слоев Земли. Однако поскольку тепло легко рассеивается с земной поверхности, то для близкорасположенных к ней горных пород, сколько бы сотен миллионов лет ни прошло, никакого повышения температуры наблюдаться не будет.

Тепловая эволюция тел, имеющих внутренние источники тепла, тесно связана с размерами этих тел. Давайте, например, попробуем сравнить Луну и Землю. Предположим, что удельное содержание радиоактивных элементов в них одинаково (в действительности же, как полагают, удельное содержание радиоактивных элементов на Луне вдвое меньше). Поскольку Луна очень мала по сравнению с Землей, доля тепла, излучающаяся с ее поверхности, по сравнению с общим количеством выделяющегося тепла в лунных недрах значительно выше, чем для случая Земли⁶. Практически Луна даже не прогревается своими внутренними источниками тепла, и поэтому на ней почти полностью отсутствуют наблюдаемые на Земле интенсивные тектонические (в частности, ведущие к образованию

⁶ Для шарообразных тел эта доля обратно пропорциональна радиусу, поскольку выделяемое количество тепла внутри такого тела пропорционально объему (то есть кубу радиуса), а излучаемое с поверхности — ее площади (то есть квадрату радиуса). — *Прим. ред.*

гор) и медленные колебательные движения коры.

На Земле, являющейся по сравнению с Лунной очень крупным телом, тепло, выделяющееся радиоактивными элементами, накапливалось, температура ее недр повышалась, и поэтому Земля после своего возникновения не остывала, как полагал лорд Кельвин, а, наоборот, разогревалась (за исключением верхнего слоя).

Важную информацию о количестве тепла, выделяемого в недрах Земли, и о распределении его источников (радиоактивных веществ) можно получить при измерении количества тепла, просачивающегося через поверхность Земли. Ученые здесь поступают подобно врачу, ставящему диагноз, прослушивая больного и измеряя его температуру. При этом прослушивание заменяется изучением внутреннего строения Земли при помощи сейсмических волн, а температуру определяют, измеряя тепловой поток, проходящий наружу через земную поверхность. Так, используя физические методы, ставят диагноз состоянию Земли.

Измерение теплового потока осуществляется следующим образом. Известно, что если спускаться вниз по рудничному или шахтному стволу, будет наблюдаться повышение температуры. Такое повышение температуры, различное для разных районов Земли, обычно составляет 20°C на каждый километр. Тепловой поток, направленный из недр Земли к ее поверхности, определяется произведением этой величины на так называемый коэффициент теплопроводности, который согласно лабораторным измерениям равен около 0,01 калории

на квадратный сантиметр, секунду и градус Цельсия. Следовательно, в нашем случае тепловой поток равен $(20/10^5) \times (1/100) = 2 \cdot 10^{-6}$, то есть через один квадратный сантиметр земной поверхности проходит за секунду около двух миллионных долей калории тепла.

Тепловой поток, поступающий из недр Земли, измерялся не только для материков, но и для океанического дна. Принцип измерения был тот же, что и для суши: в глубоководном иле измеряли разность температур для интервала глубин 1—2 метра. Затем определялся тепловой поток как произведение получаемой величины на коэффициент теплопроводности глубоководного ила. К настоящему времени накоплено большое количество данных, указывающих на то, что через каждый квадратный сантиметр глубоководного ила за одну секунду проходит из недр Земли $1,5 \cdot 10^{-6}$ калории. Таким образом, среднее значение теплового потока через океаническое дно несущественно отличается от характерного для континентов⁷.

Сравнение с солнечной энергией

В заключение этой главы давайте сравним энергию радиоактивного распада с

⁷ Существуют, конечно, участки земной поверхности, отличающиеся повышенным тепловым потоком, что свидетельствует об активизации в них эндогенных (то есть связанных с деятельностью внутренних, глубинных сил Земли) процессов. К таким участкам относятся районы современного вулканизма, глубинные разломы, рифтовые зоны океанов (например, Срединно-Атлантический, Байкальский и Красноморский рифты).— *Прим. ред.*

еще одним энергетическим источником, имеющим значение для Земли,— с солнечной энергией.

Тепловая энергия, доставляемая вертикально падающими солнечными лучами в единицу времени на единичную площадку, расположенную в Солнечной системе на расстоянии Земли от Солнца, называется солнечной постоянной и равна примерно 2 калориям на квадратный сантиметр в одну минуту. Если умножить эту величину на площадь поверхности Земли, можно приблизительно оценить общее количество энергии, получаемое Землей от Солнца. Оказалось, что удельная (на один грамм вещества) величина этой энергии за год составляет около 0,005 калории на грамм.

Это в 100 000 раз больше количества тепла, выделяемого при распаде радиоактивных веществ в недрах Земли. Однако значительная часть солнечной энергии отражается от Земли обратно в космическое пространство, а также превращается в энергию движения масс в атмосфере и гидросфере (приводя к образованию атмосферных потоков, испарению воды и т. д.— *Прим. ред.*). В итоге солнечная энергия практически не оказывает никакого влияния на температуру земных недр.

ГЛАВА II

ЗАРОЖДЕНИЕ ЗЕМЛИ

Йод-129 и ксенон-129

Прежде чем окунуться в действие яркого и красочного спектакля «История Земли», давайте познакомимся с происхождением его главных действующих лиц — урана и тория и с тем, как образовались в космическом пространстве другие химические элементы, из которых сформировалась Земля.

Как сейчас полагают, Земля образовалась в Солнечной системе 4,5 миллиарда лет назад из обширной газообразной протосолнечной туманности, и уже тогда в состав этой туманности входили составляющие современную Землю химические элементы. Но как возникла эта туманность и как произошли составляющие ее химические элементы?

Поставленные здесь вопросы очень сложны, и полного ответа на них наука пока не получила. Тем не менее уже сегодня можно сделать некоторые вполне определенные выводы. Значительная их часть следует из изучения распределения радиоактивных и стабильных изотопов химических элементов в веществе Солнечной системы.

Один из наиболее впечатляющих результатов этого изучения состоит в следующем. Ученым удалось обнаружить свидетельства в пользу того, что в метеоритах и на Земле раньше существовал один из радиоактивных изотопов йода — йод-129. Еще раз подчеркнем слова «раньше существовал», так как период полураспада йода-129 не превышает 17 миллионов лет при возрасте Земли и метеоритов

4,5 миллиарда лет. Нетрудно подсчитать, что экспоненциально уменьшаясь согласно закону радиоактивного распада, количество йода, существовавшего в момент возникновения Земли, должно за 4,5 миллиарда лет сократиться до 10^{-80} от начального значения.

Таким образом, вряд ли будет преувеличением сказать, что существовавший в момент возникновения Земли йод-129 к настоящему времени полностью исчез. Но, как уже говорилось, имеются доказательства того, что во время образования Земли некоторое количество йода-129 входило в состав вещества нашей планеты и метеоритов. Дело в том, что при радиоактивном распаде ядер йода-129 образуется ядро стабильного изотопа ксенона ксенон-129. И ученым как раз удалось доказать, что часть ксенона-129, присутствующего на Земле и в метеоритах, возникла при распаде входившего в их состав йода-129.

Поскольку период полураспада йода-129 равен 17 миллионам лет, спустя 10 периодов полураспада после возникновения Земли количество этого изотопа уменьшилось до 0,001 от первоначального. Но если уже спустя 17 миллионов лет после образования Земли и метеоритов количество йода-129 уменьшилось в 1000 раз, то современное его содержание в этих небесных телах должно быть практически равным нулю⁸. Следовательно, если в ме-

⁸ Масса Солнечной системы оценивается в $2 \cdot 10^{33}$ граммов, в одном грамме йода-129 содержится $6 \cdot 10^{23}$ атомов. Следовательно, если бы вся Солнечная система состояла только из йода-129, то в ней содержалось бы 10^{56} атомов. Это означает, что если даже Солнечная система была бы в $10^{80}/10^{56} = 10^{24}$ раза больше, то и тогда в настоящее время остался бы в лучшем случае один атом йода-129.— *Прим. ред.*

теоритах и Земле ранее имелось заметное количество этого изотопа, то надо предположить, что и в момент образования этих небесных тел из протосолнечной туманности в ней еще оставалось достаточное количество нераспавшегося йода-129.

То, что метеориты ранее содержали заметное количество йода-129, впервые было выяснено группой ученых Калифорнийского университета (США) во главе с Т. Рейнольдсом. Примененный ими для этих целей экспериментальный метод можно просто назвать блестящим. И хотя, конечно, изготовленное самим Рейнольдсом оборудование (например, плексигласовый масс-спектрометр) тоже явилось достижением, меня все же больше очаровала сама идея, лежащая в основе опыта Рейнольдса. Давайте же кратко познакомимся с этим экспериментом.

Опыт Рейнольдса

В метеоритах ксенон содержится в довольно незначительном количестве. Этот химический элемент имеет девять изотопов с массовыми числами (количеством нуклонов) 124, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 134 и 136. В опыте Рейнольдса было доказано, что среди ксенона, содержащегося в метеоритах, имеется некоторое количество ксенона-129, образовавшегося при распаде йода-129, также входившего в состав метеоритов. Другая часть ксенона-129 входила вместе с другими элементами в состав метеоритов еще в момент их образования.

Рассмотрим, как решалась задача отделения ксенона-129, образовавшегося при распа-

де йода-129, от ксенона-129, существовавшего в метеоритах самостоятельно с самого начала. Для этого использовался так называемый метод ступенчатого нагрева, который сейчас приобретает все большее признание при изучении метеоритов. Суть этого метода заключается в том, что в течение определенного времени (например, одного часа) нагревают находящийся в вакууме метеорит до температур 500, 600 и 700° С и, поддерживая температуру, измеряют количество выделяющегося ксенона-129.

Можно заранее предположить, что ксенон, существовавший в метеоритах еще при их образовании, вероятно, довольно слабо связан с минеральным веществом метеоритов. Это вызвано тем, что ксенон, будучи инертным газом, не образует химических соединений и, следовательно, может присутствовать только в межкристаллическом пространстве минерального вещества. С другой стороны, йод химически связан в кристаллах минералов и поэтому, надо полагать, довольно прочно удерживается метеоритным веществом.

Таким образом, если начать нагревать метеорит, то химически слабо связанный ксенон, существовавший еще до образования метеорита, будет улетучиваться при более низких температурах. И наоборот, ксенон, образовавшийся за счет йода-129, прочно связанного в кристаллах минералов, при этом не выделится из метеорита. Его выделение начнется только тогда, когда кристаллы в метеорите при достижении определенной температуры почти полностью разрушатся.

Этот процесс наглядно изображается на рис. 1, на горизонтальной оси которого отло-

жена температура, на вертикальной — количество ксенона-129, выделившегося при этой температуре. Следует, правда, отметить, что из данного опыта можно сделать в действительности лишь вывод о двух различных источниках ксенона, содержащегося в метеоритах. Однако при этом не доказывается, что один из них связан с распадом йода.

Чтобы доказать это, понадобился еще один, отдельный опыт. Для этого часть вещества метеорита, служившего опытным образцом, перед ступенчатым нагреванием поместили в ядерный реактор и подвергли облучению нейтронами. Единственно существующий в природе стабильный изотоп йода, йод-127, в результате облучения нейтронами превращается в ксенон-128. Таким образом в метеорите искусственно получается ксенон из йода. Следовательно, в метеорите, подвергнутом облучению нейтронами, должен существовать ксенон трех типов: ксенон-129, образовав-

Рис. 1. График опыта Рейнольдса



шийся при естественном радиоактивном распаде йода-129, искусственно созданный ксенон-128 и обычный ксенон (включая все девять изотопов), находившийся в метеорите еще при его образовании.

Если теперь облученный кусок метеорита подвергнуть ступенчатому нагреванию, то график опыта в отличие от рис. 1 будет иметь три кривые, две из которых весьма схожи: обе они соответствуют изотопам ксенона, образовавшимся при распаде йода как искусственным путем (при облучении нейтронами), так и при естественном радиоактивном распаде. Таким образом было окончательно установлено, что часть содержащегося в метеоритах ксенона-129 произошла при распаде йода-129.

Происхождение химических элементов

Теперь можно более подробно остановиться на блестящем результате опыта Рейнольдса. Дело в том, что если на ранних стадиях существования метеоритов в них присутствовал йод-129, то образование метеоритов должно было начаться не позднее чем через 100 миллионов лет после некоторого процесса ядерного синтеза (или, как говорят, нуклеосинтеза), приведшего к возникновению йода-129 и других элементов. В дальнейшем было установлено, что некоторое количество ксенона-129, содержащегося в земной атмосфере, также образовалось при распаде йода-129 (конечно, при этом использовался уже другой метод, который мы здесь не будем обсуждать из-за его громоздкости).

Из этого можно заключить, что и Земля сформировалась спустя примерно 100 миллионов лет после упомянутого процесса нуклеосинтеза⁹.

Однако хотя процесс нуклеосинтеза, в котором образовался йод-129, произошел не ранее чем за 100 миллионов лет до образования Земли и метеоритов, нет никаких оснований предполагать, что синтез всех элементов, составляющих Солнечную систему, протекал одновременно. Наоборот, имеющиеся данные указывают на то, что образование некоторых элементов происходило за чрезвычайно длительное время. В частности, об этом свидетельствует изотопный состав урана, содержащегося в Земле и метеоритах.

Ранее уже говорилось, что изотопный состав всех (за малым исключением) химических элементов чрезвычайно постоянен. Так, для основных изотопов природного урана — урана-238 и урана-235 — в настоящее время характерно отношение их содержания 137,8:1. Эта величина задается типом реакции нуклеосинтеза, в которой образовался уран. И наоборот, по изотопному составу какого-либо химического элемента можно определить тип реакции нуклеосинтеза, в которой он образовался.

Но, конечно, основываясь на изотопном составе только одного элемента (в данном случае урана), нельзя установить тип реакции нуклеосинтеза всех других элементов, а

⁹ Земля и метеориты, возможно, образовались и в разные моменты в течение этих 100 миллионов лет, но, учитывая их огромный возраст (4,5 миллиарда лет), можно считать, что они образовались практически в одно и то же время.— *Прим. ред.*

следовательно, время начала, длительность и интенсивность этих реакций.

Как же устанавливают тип реакции нуклеосинтеза, в которой образуется наблюдаемое изотопное отношение?

Для этого вначале разрабатывается несколько моделей нуклеосинтеза, основанных на различных типах ядерных реакций. Затем из реакций выбирается та, которая дает изотопное отношение, наиболее близкое к существующему. Хотя, конечно, нельзя утверждать, что в действительности протекала реакция именно этого типа, однако есть все основания считать данную модель нуклеосинтеза наиболее реалистичной.

Расчеты подобных моделей следует проводить, основываясь на изотопном составе не только урана, но и других элементов. Модель, получаемая из изотопного соотношения только одного элемента, имеет слишком много степеней свободы (то есть имеет широкий выбор различных типов реакций, протекающих в разные промежутки времени.— *Прим. ред.*), и по ней трудно сделать однозначный вывод о действительно протекавших реакциях нуклеосинтеза. Однако если использовать изотопные соотношения нескольких элементов (например, отношения содержаний изотопов урана-238 и урана-235, а также тория-232 и тория-238), широта выбора сразу же сильно сужается, и модель нуклеосинтеза гораздо более успешно согласуется с данными наблюдений.

Современные представления о ходе нуклеосинтеза элементов, полученные из анализа изотопных отношений различных элементов в

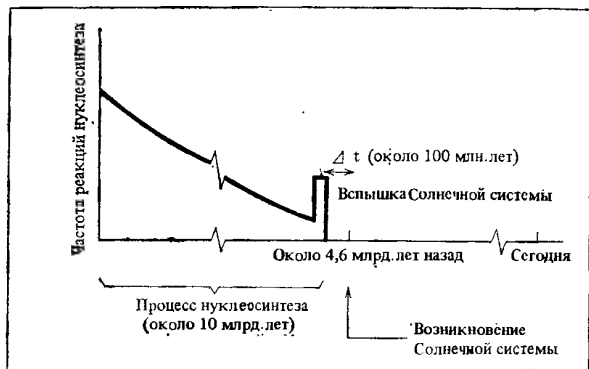
Солнечной системе, отражены на рис. 2.

Поскольку было установлено, что в Земле и в метеоритах присутствовал ранее йод-129, то существовал некий процесс нуклеосинтеза элементов, протекавший примерно за 100 миллионов лет до возникновения Солнечной системы.

На рис. 2 он показан кратковременным всплеском реакций нуклеосинтеза около 4,6 миллиарда лет назад. Этот всплеск нуклеосинтеза в самом конце основного процесса нуклеосинтеза элементов в нашем районе Галактики иногда условно называют «вспышкой Солнечной системы».

Совсем недавно удалось установить, что в состав некоторых метеоритов ранее входил изотоп алюминий-26, подверженный распаду еще быстрее, чем йод-129 (его период полураспада всего 740 тысяч лет). Это указывает на то, что, возможно, «вспышка Солнечной системы» произошла непосредственно перед

Рис. 2. Схема нуклеосинтеза элементов



процессом образования Солнечной системы¹⁰.

Кроме того, основываясь на отношениях изотопов урана, тория и других элементов, было установлено, что основной процесс нуклеосинтеза продолжался в общей сложности около 10 миллиардов лет и его интенсивность уменьшалась с течением времени по экспоненциальному закону (отложенная на рис. 2 по вертикальной оси частота протекания ядерных реакций соответствует интенсивности этого процесса)¹¹.

¹⁰ Существует мнение, что причиной «вспышки Солнечной системы» стал произошедший сравнительно недалеко от Солнечной системы взрыв Сверхновой звезды. Как считают ряд исследователей, под воздействием ударной волны от этого взрыва протосолнечная туманность стала сжиматься, что и привело к началу формирования Солнечной системы.

¹¹ Приводятся различные точки зрения относительно продолжительности основного процесса нуклеосинтеза элементов. В частности, большинство ученых склоняются к мнению, что нуклеосинтез урана, тория и других тяжелых элементов в нашем районе Галактики произошел внезапно, то есть за сравнительно короткое время. В этом случае теоретические расчеты, основанные на современных изотопных отношениях для этих элементов, предсказывают, что процесс нуклеосинтеза протекал 4—6 миллиардов лет. Астрофизические данные о распределении химических элементов в Галактике приводят к выводу о том, что процесс образования элементов в Галактике начался 9—14 миллиардов лет назад. Верхний предел этой величины близок к оценке М. Озимы. С другой стороны, содержание легких элементов (например, дейтерия, гелия) предполагает, что их образование в основном произошло задолго до возникновения Галактики (хотя их образование продолжается в недрах звезд и в настоящее время). Нуклеосинтез этих элементов связывается с началом расширения Метагалактики.— *Прим. ред.*

От газовой туманности к микропланетам

Около 4,5 миллиарда лет назад в результате протекавших ранее процессов нуклеосинтеза уже существовал весь набор химических элементов, составляющих нашу Солнечную систему. Химические элементы находились в космическом пространстве в виде межзвездного газа (с примесью пыли), иногда концентрирующегося в облака. К таким облакам относилось и протосолнечное, которое обладало почти той же массой, что и современная Солнечная система. При сжатии в его центре сформировалось Солнце. Согласно теоретическим представлениям масса межзвездного газа, из которого образовалась Солнечная система, должна составлять 1,05 массы Солнца. Как показывают расчеты, системы подобного типа, то есть имеющие в центре лишь одну звезду, не могут сформироваться, если масса газа больше или меньше этого значения.

На ранних стадиях сжатия облака, еще до того как в его центре образовалось Солнце, облако, медленно вращаясь, начало постепенно уплощаться и приняло дискообразную форму. Именно с этого момента, собственно, и началась стадия протосолнечной туманности. Поскольку в это время температура в туманности стала падать, возникла конденсация составляющего ее газа. В результате протосолнечная туманность, по-видимому, стала состоять в основной своей внешней части из бесчисленного множества мелких частиц размером несколько миллиметров. В дальнейшем, по мере того как облако ста-

новилося все более плоским, плотность его вещества увеличивалась, и вследствие механической неустойчивости облако разделилось на группы тел размером около 10 километров, называемых микропланетами, или планетези-малиями¹².

Микропланеты в результате повторявшихся столкновений друг с другом сливались, разрастаясь в конце концов до размеров планет, таких, как, скажем, Земля и Марс. Как показывают расчеты, время, необходимое для формирования планет типа Земли или Марса из протосолнечной туманности, составляет от нескольких миллионов до нескольких десятков миллионов лет. Это хорошо согласуется с выводом, сделанным на основании существования в прошлом йода-129, о том, что промежуток времени, прошедший с момента завершения реакций нуклеосинтеза элементов до эпохи формирования Земли и метеоритов, равнялся около 100 миллионов лет.

Однородность состава Солнечной системы

Как уже отмечалось, изотопный состав химических элементов, существующих в Солнечной системе, в общем очень постоянен. Первые сведения об однородности изотопного состава были получены при изучении

¹² К выводу о разделении протосолнечной туманности на микропланеты почти одновременно пришли, исходя из общих представлений о механике протосолнечной туманности, Э. Эджуорт (США), И. И. Гуревич и Е. Е. Лебединский (СССР), В. С. Сафронов (СССР), Г. Голдрейх и У. Уард (США), а также Ч. Хаяши (Япония).

пород Земли. Затем такая же однородность обнаружилась в породах Луны и метеоритов.

Однако есть и исключения. В случае с изотопами свинца они, например, связаны с существованием изотопов, образующихся при распаде других элементов. Когда вещество минералов содержит много урана и тория, доля образующихся при их распаде изотопов свинец-206, свинец-207 и свинец-208 становится большей. Поэтому можно ожидать, что будут иметь разные значения отношения изотопов свинца в этих минералах и в минералах, совсем не содержащих урана и тория или содержащих их там в очень малых количествах. Кроме того, изотопные отношения урана и тория являются постоянными, только если их наблюдать в один и тот же момент. С течением же времени они изменяются в результате радиоактивного распада, и поэтому изотопные составы урана и тория в настоящем и прошлом различны.

С другой стороны, изотопы элементов, совершенно не различимые химически, из-за небольшой разницы в массе ведут себя в физических процессах несколько отлично. Например, при кипячении воды будут преимущественно испаряться молекулы, в которых водород представлен обычным (легким) изотопом. При этом в оставшейся воде постепенно будет увеличиваться доля так называемой тяжелой воды, в состав молекул которой входит дейтерий. Однако в обычных условиях обогащенность каким-либо изотопом в результате различных природных процессов не превышает 1 %.

Если учитывать эти исключения, изотопный состав встречающихся в природе химических

элементов в основном однороден. Открытие этого явления — одно из самых выдающихся достижений в изучении истории образования планет с 50-х годов.

Каков же смысл однородности изотопного состава?

Мы установили, что изотопный состав определяется типом реакции нуклеосинтеза элементов. Одинаковое же значение изотопного состава химических элементов, слагающих Солнечную систему, вряд ли образовалось случайно (слишком уж большое нагромождение случайностей требовалось бы для этого). И самым разумным объяснением является то, что химические элементы, слагающие Землю, метеориты, а также Луну, образовались в одних и тех же реакциях нуклеосинтеза. Образно говоря, вещество, из которого образовались планеты и метеориты, «сварилось» в одном «котле».

Все эти геохимические и космохимические данные хорошо согласуются с астрофизическими представлениями о том, что Солнце и планеты образовались из существовавшего тогда межзвездного газа. Химические элементы, образующиеся в бесчисленно раз повторяющихся реакциях нуклеосинтеза, были в нем столь хорошо перемешаны, что сформировавшаяся в конце концов Солнечная система стала обладать достаточно однородным изотопным составом.

Правда, не все так просто. Сравнительно недавно, например, появилось сообщение ученых из Чикагского университета о том, что в исследовавшемся ими метеорите Алленде (по названию места в Мексике, около которого он был найден) отношение изотопов

кислорода довольно сильно отличается от значения, характерного для вещества Солнечной системы в целом. Достаточно ясного ответа на вопрос, каково происхождение кислорода с этим необычным изотопным соотношением, пока не имеется. Некоторые ученые предполагают, что метеорит Алленде вобрал в себя вещество, образовавшееся при взрыве Сверхновой, произошедшем непосредственно перед началом формирования Солнечной системы, но «примешавшееся» в вещество Солнечной системы локально (то есть не распространившееся по всей системе).

Какой могла быть эта нарушившая однородность примесь — это одна из многих проблем происхождения Солнечной системы.

Природный ядерный реактор

С проблемой однородности изотопного состава Земли связано и недавно обнаруженное поразительное природное явление, ставшее широко известным под названием феномена Окло.

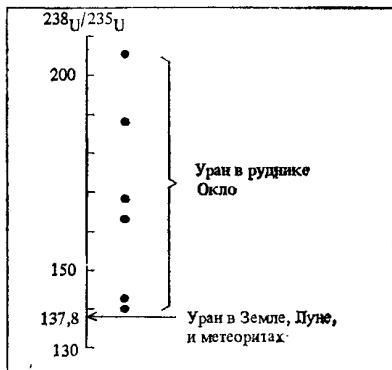
В 1972 г. появилось в печати сообщение французских ученых о том, что в руднике Окло, находящемся в государстве Габон, расположенном в Западной Африке у берегов Атлантического океана, ими обнаружен уран с крайне необычным изотопным составом. При этом утверждалось, что такой изотопный состав произошел в результате протекавшей в этом районе около 1,8 миллиарда лет назад цепной реакции деления ядер урана. В общем, в своем сообщении французские ученые предположили, что 1,8 миллиарда лет назад в природе произошла цепная реакция, подобно

протекавшим при ядерных взрывах в Хиросиме и Нагасаки, которые мы, японцы, никогда не сможем забыть.

В ходе цепной реакции (в том числе и приводящей к ядерному взрыву) изотопный состав урана изменяется. На рис. 3 показаны изотопные отношения урана, измеренные для руды в Окло. Полученные значения имеют разброс до 40%, тогда как повсюду за пределами Окло это значение остается практически постоянным, проявляя примечательную устойчивость. И необычно большие изотопные отношения урана иначе как с помощью ядерного взрыва не объяснить.

Следует отметить, что возможность природного ядерного взрыва в прошлом уже была предсказана к тому времени теоретически. Для того чтобы самопроизвольно началась цепная реакция, природный уран должен был быть в достаточной степени обогащен ура-

Рис. 3. Изотопное отношение урана ($^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$) из рудника Окло



ном-235, содержание которого в природном уране в настоящее время не превышает 0,72%. Дело в том, что сколько ни собирай вместе урана-238 (основного изотопа природного урана), цепная реакция не начнется. Поэтому, как известно, для получения более эффективного горючего из природного урана для ядерных реакторов необходимо путем очень сложных и дорогостоящих операций повысить в нем концентрацию урана-235¹³.

С другой стороны, уран-238 по сравнению с ураном-235, имеющим период полураспада 700 миллионов лет, обладает очень длительным периодом полураспада — 4,5 миллиарда лет. И если мы мысленно отправимся в прошлое, то количество урана-235, имеющего более

¹³ В обычных условиях ядра двух основных составляющих природного урана ведут себя по-разному после захвата нейтрона: ядро урана-238 лишь его поглощает, тогда как ядро урана-235 расщепляется. Чтобы расщепить уран-238, требуется дополнительный источник энергии, и попытка просто «разжечь» уран-238 схожа с попыткой поджечь мокрые дрова. Вся надежда на возникновение цепной реакции деления урана-235, которая сможет «обсушить дрова». Однако этого изотопа слишком мало в природном уране, и ядра урана-238 успевают поглотить нейтроны, необходимые для цепной реакции. Конечно, при достаточно сильном обогащении ураном-235 эта реакция может все же начаться. Но такое обогащение не обязательно, и, как известно, природный уран с успехом может использоваться в качестве топлива в ядерных реакторах. Дело в том, что, если искусственно снизить скорости нейтронов, их энергии будет недостаточно для захвата и поглощения ураном-238, но еще вполне достаточно для расщепления ядер урана-235. Веществами, эффективно замедляющими нейтроны, являются графит и тяжелая вода. Однако при некотором обогащении ураном-235 в качестве вещества-замедлителя вполне подходит и обычная вода.— *Прим. ред.*

короткий период полураспада, станет быстро увеличиваться по сравнению с ураном-238. Сейчас количество урана-235 в природном уране не превышает 0,72%, а 1 миллиард лет назад оно уже должно было составлять около 2%.

Но этого мало. Еще одним условием, необходимым для начала цепной реакции в прошлом, даже в обогащенном природном уране, является наличие воды. Ведь вода эффективно замедляет нейтроны, что и приводит к цепной реакции. Размышляя над этой проблемой, Дж. Уезерилл и М. Ингрэм пришли к выводу, что хотя обогащенность ураном-235 и была, по-видимому, достаточной для начала цепной реакции в природном уране в прошлом, однако такая реакция, вероятно, никогда не могла там происходить, так как вблизи минералов не было тогда достаточного количества воды, необходимой для замедления нейтронов.

Однако впоследствии оказалось, что расчеты Уезерилла и Ингрэма были отнюдь не безупречными. Так, вскоре после опубликования их работы Казио Курода из Арканзасского университета (США) показал, что при образовании залежей урановой руды в прошлом должно было присутствовать вокруг достаточное количество воды, чтобы в соответствующей степени замедлить нейтроны (следовательно, вероятность начала природной цепной реакции была достаточно высокой). Прошло 8 лет, и феномен Окло, видимо, подтвердил предсказание Куроды. Правда, нигде за пределами Окло следов подобного природного ядерного реактора не обнаружено.

О возрасте Земли

До сих пор то, что возраст Земли составляет 4,5 миллиарда лет, принималось нами почти как нечто само собой очевидное. Но, собственно говоря, каким образом было установлено, что возраст Земли, по-видимому, составляет 4,5 миллиарда лет?

Земля, как уже неоднократно говорилось, обладает внутренним источником тепла, являющимся решающим фактором в ее развитии. И его существование стало причиной различных движений земной коры, бесчисленно раз происходящих после ее образования. Поэтому обнаружить породы, сформировавшиеся в период становления Земли как планеты, фактически невозможно. А ведь анализ лишь этих пород при помощи рассмотренных далее методов определения абсолютного возраста смог бы точно установить время, когда образовалась Земля. Однако надеяться на это совершенно бессмысленно.

Возраст, принятый в настоящее время для Земли, определен косвенно — по возрасту метеоритов. Можно считать, как уже говорилось, что Земля и метеориты сформировались почти в одно и то же время. На это хотя бы указывает то, что и в Земле и в метеоритах раньше должно было содержаться значительное количество йода-129, имеющего период полураспада 17 миллионов лет. А поскольку Земля и метеориты образовались почти в одно и то же время, то если бы удалось достоверно определить возраст метеоритов, его можно было бы считать и возрастом Земли.

Для определения абсолютного возраста пород существуют различные методы. Мы их

рассмотрим в одной из следующих глав. Здесь же приведем результаты определения возраста метеоритов.

Все метеориты разделяются на три большие группы: каменные, железные и железо-каменные, занимающие как бы промежуточное положение между первыми двумя группами. До сих пор достаточно точные определения возраста имеются только для каменных метеоритов, содержащих сравнительно большое количество радиоактивных элементов. Железные метеориты почти не содержат радиоактивных элементов, используемых при определении возраста, и поэтому достоверных сведений о возрасте таких метеоритов пока нет, хотя и имеются успешные определения возраста для силикатов, входящих в состав таких метеоритов (так называемых силикатных включений).

Измерения возраста метеоритов, сделанные к настоящему времени, дают результаты, мало зависящие от типа метеорита и способа определения, в интервале 4,5—4,6 миллиарда лет. С точностью до нескольких десятков миллионов лет, зависящей от типа метеорита, среднее значение принято равным 4,55 миллиарда лет. Поскольку возраст Земли и метеоритов предполагается одинаковым, то возраст нашей планеты также считается около 4,55 миллиарда лет.

Совершенно очевидно, что экспериментально нельзя проверить достоверность возраста Земли, определенного таким образом. Но здесь следует отметить и условность принятого численного значения для возраста Земли. Ведь пока неясно, в каком физическом и химическом состоянии находилась Земля в то

время. Да и вообще непонятно, с какого момента надо отсчитывать ее возраст: с того, когда она достигла современных размеров, или, может, с того, когда Земля расслоилась на ядро, мантию и кору?

Таким образом, пока нет ответа на вопрос, какому из названных случаев соответствует значение возраста Земли, принятое по аналогии с возрастом метеоритов. Поэтому в настоящее время, говоря о возрасте 4,55 миллиарда лет, просто считают, что в это время Земля начала свое существование как обособленное тело Солнечной системы.

Химический состав земных недр

Большая часть имеющейся на сегодня информации о строении недр Земли, расположенных под земной корой, получена на основании сейсмических исследований. Сейсмическими волнами называются упругие колебания, распространяющиеся в Земле и возбуждаемые различными землетрясениями. Траектория и скорость распространения сейсмических волн зависят от плотности и упругих свойств вещества, а также от температуры и давления в недрах Земли. Следовательно, анализируя данные, полученные при регистрации волн от землетрясений, можно получить сведения об этих характеристиках вещества.

Но как узнать о химическом составе недр Земли?

Мантийное вещество, частично расплавляясь, образует магму, которая извергается на поверхность Земли, формируя вулканические (эффузивные) горные породы. Состав этих пород должен в некоторой степени от-

ражать химический состав мантии. Кроме того, в вулканических породах содержатся фрагменты пород мантии, которые магма захватывает во время своего подъема к поверхности Земли. Исследование таких фрагментов (их геологи называют ксенолитами) дает наиболее непосредственную информацию о химическом составе мантии.

Однако следует отметить, что при частичном плавлении мантийного вещества в первую очередь в расплав переходят породы и минералы, имеющие более низкую температуру плавления. В результате начинается так называемый процесс дифференциации (разделения) вещества, и поэтому вулканические породы по своему составу, вообще говоря, отличаются от исходного мантийного вещества. С другой стороны, ксенолиты, хотя и с очень большой вероятностью представляют собой мантийное вещество, но их содержание в вулканических породах настолько мало, что делать выводы о составе вещества мантии в целом на основании анализа ксенолитов вряд ли правомочно.

В настоящее время наиболее важным источником информации о составе внутренних областей Земли являются... метеориты. Эти небесные тела, в которых до нашего времени в «замороженном» виде дошло первоначальное физическое и химическое состояние Солнечной системы, можно считать своеобразными окаменелостями эпохи протосолнечного облака. Кроме того, если не считать доставленных на Землю пород Луны, это единственное доступное прямому исследованию внеземное вещество, являющееся неоценимым материалом при изучении вещества всей Солнеч-

ной системы. По этой причине метеориты с давних пор привлекали внимание ученых.

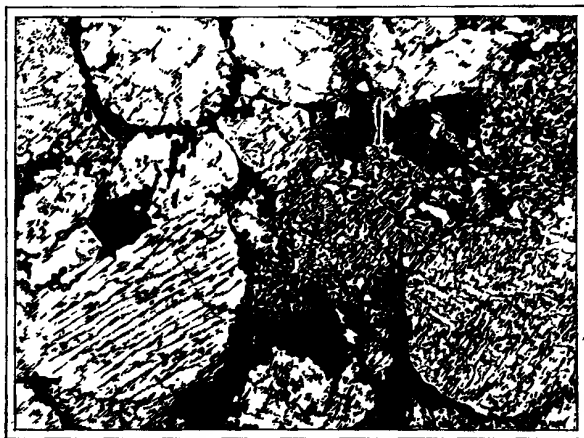
Давайте вновь вернемся к процессу формирования планет из протосолнечного облака. Как мы помним, газ, из которого состояла протосолнечная туманность, в некоторый момент стал остывать, что привело к конденсации частиц. Данный процесс похож на конденсацию водяного пара в земной атмосфере при образовании облаков. Со временем облако сконденсировавшихся частиц расширялось, и полагают, что в пределах протосолнечной туманности составляющие его элементы были хорошо перемешаны. Следовательно, можно предположить, что на всем своем огромном протяжении протосолнечная туманность имела одинаковый химический состав, если пренебречь особенно летучими элементами. Поэтому Земля и метеориты, несмотря на свое образование в разных местах туманности, должны сейчас иметь схожий химический состав.

Но опять же это не должно касаться так называемых летучих элементов, к которым относят, в частности, инертные газы, щелочные металлы, серу и ртуть. Как это и можно было ожидать, их содержание изменяется в зависимости от места, в котором сформировалось то или иное тело Солнечной системы. Вблизи Солнца под действием излучаемого им тепла температура в облаке сконденсировавшихся частиц повышалась, что привело к рассеянию летучих элементов. Именно по этой причине у Меркурия, расположенного наиболее близко к Солнцу, так велико содержание тугоплавкого железа и, как результат, высокая по сравнению с другими планетами

плотность вещества. У удаленного от Солнца Юпитера главной составной частью стали водород, инертные газы, вода и тому подобные летучие соединения, и, как следствие, его вещество имеет малую плотность.

Как считают в настоящее время, средний химический состав Земли очень близок к химическому составу одного из классов каменных метеоритов — так называемых хондритов. Они составляют большую часть группы каменных метеоритов, и к этому классу относятся 70—80% всех до сих пор найденных на Земле метеоритов. Хондритами их называют из-за того, что они содержат в большом количестве хондры (от греческого слова «хондрос» — зернышко) — круглые силикатные частицы диаметром около миллиметра (рис. 4).

Рис. 4. Метеорит Ямато (Антарктида), относящийся к хондритам. Видны круглые зерна — хондры. Ширина фрагмента 2,2 миллиметра (по снимку Кимуры)



Имеется подробная классификация хондритов по их химическому и минералогическому составам. Однако относительно того, какой же из видов хондритов этой классификации наиболее близок к Земле по среднему химическому составу, единого мнения нет. Некоторые, например, считают, что это так называемые углистые (со сравнительно высоким содержанием углерода) хондриты типа 1 (называемые чаще хондритами C1).

В табл. 3 указан средний химический состав вещества Земли для различных ее составляющих, определенный в основном по аналогии с составом метеоритов. При этом средний состав вещества ядра устанавливался по железным метеоритам, а вещество мантии — по каменным метеоритам. Отдельно дан состав для континентальной и океанической земной коры, полученный из химического анализа образцов грунта, непосредственно отобранных в соответствующих областях земной коры. Эту таблицу ни в коем случае нельзя рассматривать как окончательную, существует много других предположений о химическом составе Земли.

При современном уровне развития техники получение образцов пород с помощью бурения уже на глубине нескольких километров от поверхности Земли вызывает чрезвычайные затруднения. И вряд ли в ближайшем будущем есть надежда поднять породы с больших глубин — из мантии, верхняя граница которой находится на уровне нескольких десятков километров от земной поверхности, а тем более из ядра, залегающего еще на 3000 километров глубже. Поэтому пока не приходится и ожидать, что можно будет опреде-

Таблица 3

Химический состав Земли, %
(по Эристу, 1969 г.)

Химические соединения	Континентальная кора	Океаническая кора	Мантия	Ядро
SiO ₂	60,1	49,9	38,3	
TiO ₂	1,1	1,5	0,1	
Al ₂ O ₃	15,6	17,3	2,5	
Fe ₂ O ₃	3,1	2,0		
FeO	3,9	6,9	12,5	
FeS			5,8	
Fe			11,9	90,8
Ni			1,4	8,6
Co			0,1	0,6
MgO	3,6	7,3	24,0	
CaO	5,2	11,9	2,0	
Na ₂ O	3,9	2,8	1,0	
K ₂ O	3,2	0,2	0,2	
P ₂ O ₅	0,3	0,2	0,2	

лять химический состав Земли, используя прямой анализ образцов.

Состав Солнечной системы в целом

Рассмотрим теперь, как можно оценить средний химический состав Солнечной системы в целом?

Здесь наиболее важным источником информации являются те же метеориты. Как уже говорилось, газ протосолнечной туманности, из которого впоследствии образовались планеты, был, за исключением летучих элементов, перемешан до довольно однородного состояния. Об этом говорит чрезвычайное постоянство химического состава, обнаружен-

ное при изучении вещества Земли, метеоритов, лунных пород, при анализе состава солнечного ветра (потока частиц, испускаемого Солнцем) и при изучении содержания элементов на поверхности и в короне Солнца (по анализу спектральных линий).

Метеориты, разумеется, составляют очень небольшую долю общей массы Солнечной системы. Однако если предполагать однородность состава для газа всей протосолнечной туманности, то химический состав хондритов С1 можно считать присущим всей Солнечной системе в целом. Во всяком случае это подтверждается тем, что за исключением инертных газов и других летучих элементов, химический состав хондритов С1 совпадает с составом солнечной поверхности, определенным по линиям в спектре солнечного излучения.

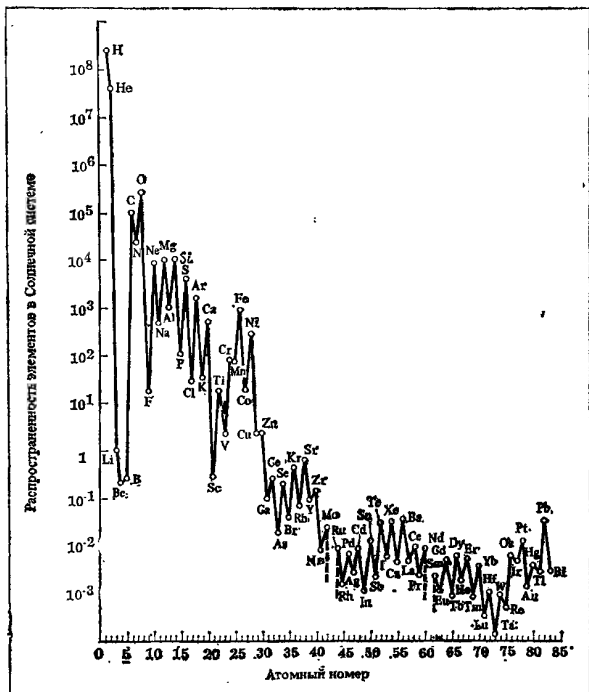
Что же касается инертных газов, водорода и других летучих элементов, то их содержание в твердом веществе метеоритов невелико по сравнению с газом протосолнечной туманности. Представление об их распространении в Солнечной системе можно получить из спектра излучения солнечной поверхности, а также из данных по регистрации солнечного ветра в высоких слоях земной атмосферы и на поверхности Луны. Однако для трех самых тяжелых стабильных инертных газов¹⁴ (аргона, криптона и ксенона), у которых не наблюдаются спектральные линии, степень распространенности в Солнечной системе оценивается косвенным образом.

Дело в том, что существует некоторая за-

¹⁴ К инертным газам относят еще и радон, который является радиоактивным.— *Прим. ред.*

висимость элементов распространенности в Солнечной системе от их атомного номера. Она представлена на рис. 5, откуда видно, что распространенность элементов уменьшается от более легких к более тяжелым почти по экспоненциальному закону (немного различному для элементов с четными и нечетными атомными номерами). Если провести линию,

Рис. 5. Распространенность химических элементов в Солнечной системе



соединяющую точки на графике этой зависимости, соответствующие элементам с атомными номерами 16 (сера) и 20 (кальций), то точка этой линии, соответствующая атомному номеру 18, как раз и даст степень распространенности аргона в Солнечной системе.

Подобным же образом оценивается содержание криптона и ксенона в Солнечной системе.

В заключение перечислим основные источники информации о распространенности химических элементов в Солнечной системе:

для нелетучих элементов — из анализа хондритов Cl;

для летучих элементов, в том числе легких инертных газов (гелия, неона), — из анализа спектра излучения солнечной поверхности;

для тяжелых инертных газов (аргона, криптона, ксенона) — на основании зависимости между степенью распространенности элемента в Солнечной системе и их атомным номером (см. рис. 5), полученной Камероном и используемой в настоящее время как стандартной,

ГЛАВА III

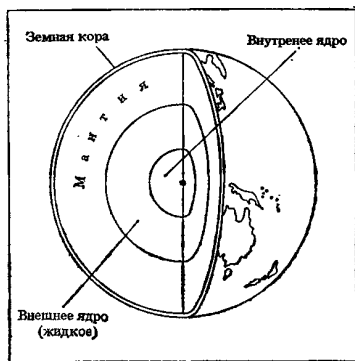
КАК ПРОИЗОШЛО РАССЛОЕНИЕ ЗЕМЛИ

Главная особенность строения Земли

Наиболее характерной особенностью структуры земных недр является их явное слоистое строение. Если бы можно было нарезать Землю кружочками, она оказалась бы удивительно похожей на репчатый лук (рис. 6).

На расстояние до 3500 километров от центра Земли простирается ядро. Эта часть земных недр сложена, как полагают, главным образом из железа и никеля, к которым на 10—20% примешаны более легкие элементы. Однако какие именно легкие элементы входят в состав ядра, неясно. Некоторые утверждают, что это сера, другие высказываются в пользу кремния, а сравнительно недавно было выдвинуто предположение о наличии

Рис. 6. Строение Земли



там окислов железа. В общем, до окончательного решения этой проблемы еще далеко.

Ядро само имеет два слоя. Расположенное ближе к центру Земли внутреннее ядро имеет диаметр около 1200 километров, и его вещество находится в твёрдом состоянии. Наружный слой, внешнее ядро, является жидким, представляя собой, как предполагают, железо-никелевый расплав.

Слой Земли, простирающийся от внешней границы ядра и доходящий почти до земной поверхности, называется мантией. Предполагают, что ее состав близок к составу перидотитов (называемых также оливиновыми породами¹⁵). Вне слоя мантии расположена так называемая земная кора. На континентах ее толщина достигает 40—50 километров, тогда как в океанических районах она не превышает нескольких километров.

Большая часть сведений о слоистой структуре Земли была получена при изучении распространения сейсмических волн, а также при лабораторных исследованиях состояния вещества при высоких давлениях (в центральной части Земли давление может достигать

¹⁵ По этому названию многие читатели, вероятно, вспомнят известный роман А. Н. Толстого «Гиперболонд инженера Гарина», герой которого искал для своих авантур золото в «оливиновом поясе». Дело в том, что незадолго до выхода в свет этого романа, в 1909 году, было установлено существование так называемой поверхности Мохоровичича (по фамилии впервые ее обнаружившего югославского геофизика) — границы раздела между корой и мантией. На основании сейсмических исследований было выдвинуто предположение о том, что оливиновые породы (перидотиты) и составляют вещество мантии. А. Н. Толстой, живо интересовавшийся научными новостями, использовал это предположение в своем романе. — *Прим. ред.*

3 000 000 атмосфер). Но в какой же момент истории Земли произошло ее расслоение? Или, быть может, оно уже существовало в момент формирования нашей планеты?

Происхождение слоистого строения Земли представляет собой проблему первостепенной важности для специалистов, занимающихся изучением геологической истории нашей планеты.

Как образовалось ядро Земли

Согласно существующим представлениям о формировании ядра Земли ее вещество непосредственно после возникновения Земли было довольно однородным, а процесс выделения железо-никелевого ядра начался позднее. Первоначально однородная Земля образовалась из микрочастиц, подобных тем, которые можно наблюдать в метеоритах. После своего формирования Земля стала разогреваться за счет энергии, выделявшейся в процессе гравитационной аккумуляции частиц, и за счет энергии радиоактивного распада элементов. В связи с этим началось образование железо-никелевого расплава, который в силу большого удельного веса опускался к центру Земли, формируя ядро.

Однако эта гипотеза сталкивается с рядом трудностей. Во-первых, неясно, каким образом железо-никелевый сплав, пусть даже в расплавленном состоянии, мог пройти более 1000 километров, прежде чем достичь района ядра? Эта проблема обязательно встает при рассмотрении возникновения ядра из первоначально однородной Земли.

Во-вторых, для того, чтобы из силикатов, схожих с теми, что встречаются в метеоритах, образовался железо-никелевый сплав, необходимо протекание соответствующих реакций восстановления¹⁶. Но образование никелистого железа при его восстановлении из силикатов должно сопровождаться выделением количества кислорода, почти равного количеству восстановленного железа. Даже если прикинуть это количество на глазок, то оно все равно должно быть близко к массе земной коры. Если допустить, что весь этот кислород вышел за пределы Земли, образовав ее атмосферу, то давление в ней должно составить несколько сотен тысяч атмосфер. Какие-нибудь свидетельства в пользу существования такой атмосферы в прошлом совершенно отсутствуют.

Наконец, в-третьих, имеется еще проблема с количеством никеля, входящего в состав мантийного вещества, наблюдаемого иногда в вулканических породах. В оливиновых породах, захватываемых магмой из мантии при движении к поверхности Земли, содержание никеля составляет около 0,1%. Однако никель имеет очень сильное химическое сродство с железом, и в случае образования земного ядра при восстановлении из силикатов никакого никеля в них не должно было остаться. То, что в действительности в мантийном веществе присутствует 0,1% никеля, вообще говоря, свидетельствует против выделе-

¹⁶ Восстановление, например, железа из силикатов, составляющих оливиновые породы, осуществляется в окислительно-восстановительных реакциях Fe_2SiO_4 (силикат железа, или фаялит) $+ 2\text{H}_2 = 2\text{Fe} + \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ или других с выделением кислорода.— *Прим. ред.*

ния железа за счет его восстановления из силикатов.

Таким образом, имеется ряд фактов, не укладывающихся в традиционную схему формирования ядра: образование однородной Земли, состоящей из силикатов (в основном ферро-магнезиальных, входящих в состав оливиновых пород.— *Прим. ред.*), восстановление никелистого железа из силикатов → погружение железо-никелевого расплава в район ядра → формирование ядра Земли.

Теория неоднородной аккумуляции

Чтобы избежать этих противоречий, в последнее время все больше выдвигается гипотез, утверждающих, что образование ядра происходило одновременно с процессом формирования Земли. Иначе говоря, в них допускается, что в момент завершения формирования Земли в ней уже имелась основа слонстой структуры: система ядро — мантия. Такие гипотезы связываются с теорией неоднородной аккумуляции, или аккреции, в рамках которой предполагается, что процесс разделения вещества начался еще при конденсации микрочастиц в протосолнечной туманности.

Перед образованием Земли протосолнечная туманность, как полагают, имела температуру несколько тысяч градусов по шкале Кельвина, но затем постепенно остыла за счет излучения тепла. Газ, из которого состояла протосолнечная туманность, был представлен в основном водородом и гелием. Такой состав очень близок к выведенной пространенности химических элементов в со-

временной Солнечной системе, о чем говорилось в предыдущей главе. Когда температура протосолнечной туманности была еще высока, все атомы находились в состоянии беспорядочного, хаотического движения. С понижением температуры атомы-«единомышленники» (то есть обладающие высоким химическим сродством друг с другом) стали соединяться химически, образуя более устойчивые молекулы, которые затем начали конденсироваться в микрочастицы (то есть переходить в твердое состояние).

Довольно уверенно можно представить порядок конденсации молекул внутри протосолнечного облака по мере понижения его температуры, если исходить из термодинамических представлений. Это нашло отражение в так называемой теории конденсации, интенсивно разрабатываемой группой исследователей из Чикагского университета. При этом в качестве химического состава протосолнечной туманности, естественно, были приняты данные о распространении элементов в Солнечной системе (см. рис. 5). В процессе снижения температуры протосолнечной туманности сначала стали конденсироваться молекулы соединений, имеющих более высокую температуру испарения (конкретная последовательность определялась химическим составом облака). При сравнительно медленном остывании протосолнечного облака химическое равновесие почти не нарушалось, и поэтому последовательность образования химических соединений вполне рассчитывается теорией конденсации.

Молекулами, которые начали конденсироваться первыми, были окислы $MgAl_2O_4$

(плейонаст) и CaTiO_3 (перовскит), за ними последовали железо и никель. Расчеты показывают, что конденсация этих молекул должна была начаться в интервале температур 1300—1200 К. При дальнейшем остывании, когда температура снизилась до 1000 К, начали конденсироваться силикаты марганца и соединения серы. Затем по мере продолжающегося уменьшения температуры конденсировались олово и серебро, а позже — соли свинца и окислы железа. Когда температура снизилась почти до характерной для сегодняшней Земли, сконденсировались крупные молекулы, включающие воду. Все эти соединения в ходе повторявшихся столкновений друг с другом образовывали микрочастицы, из которых затем в ходе аккумуляции формировались планеты.

Теперь допустим, что процесс аккумуляции протекал параллельно образованию микрочастиц. В этом случае частицы по мере их образования сразу же вовлекались бы в процесс аккумуляции. Причем частицы, образующиеся на ранних стадиях процесса конденсации, стали бы формировать центральную часть будущей Земли. Как мы помним, микрочастицы, конденсирующиеся на самых ранних стадиях, состоят из сложных окислов магния (плейонаста) и кальция (перовскита), за ними следуют железо и никель. Следовательно, при таком характере процесса аккумуляции центральную часть Земли должны были образовать плейонаст и перовскит, а также железо и никель. Снаружи бы расположились силикаты, а на самой периферии — летучие соединения, содержащие воду.

Только вдумайтесь, как гипотеза, основан-

ная лишь на том, что конденсация и аккумуляция протекали одновременно и параллельно, удивительно красиво объясняет формирование слоистого строения Земли. Но, к сожалению, в этом случае скорость образования Земли оказывается слишком высокой и противоречит общим представлениям о механике формирования планет.

Таким образом, если первая теория — однородной аккумуляции — находится в противоречии с рядом геохимических фактов, то вторая — неоднородной аккумуляции — вызывает серьезные сомнения с точки зрения механики. Этим объясняется, что в последнее время получила популярность теория, занимающая промежуточное положение между теориями однородной и неоднородной аккумуляции¹⁷. Она допускает, что формирование Земли началось после конденсации всех частей (этим она близка к первой теории), однако в процессе аккумуляции частицы, состоящие главным образом из железа и никеля, слипались более легко, чем силикатные

¹⁷ Подобные теории формирования ядра Земли, одна из которых (Ч. Хаяши) рассматривается дальше подробно, не могут все же удовлетворительно объяснить проблему восстановления железа и никеля из силикатов. В связи с этим некоторые ученые считают, что ядро Земли в основном состоит из металлизированных силикатов, то есть силикатов, перешедших под действием давления вышележащих слоев в плотное металлическое состояние. В этом случае содержание металлического железа в ядре может составлять всего несколько процентов. На возможность перехода силикатов в металлизированное состояние указывают результаты экспериментов, проведенных в 1974 году советскими учеными во главе с Л. Ф. Верещагиным. — *Прим. ред.*

частицы (этим она, в сущности, ничем не отличается от второй теории).

В рамках этой теории снимаются трудности, связанные с объяснением одновременного начала конденсации и аккумуляции с точки зрения механики, а образование железо-никелевого ядра Земли за счет того, что железо и никель аккумулируют раньше. Правда, насколько избирательная аккумуляция частиц осуществима механически, пока еще неясно.

Дальнейший прогресс в исследованиях

Теория неоднородной аккумуляции в свое время получила сильную поддержку от ученых, для которых объектом изучения всегда была собственно только Земля. С их точки зрения наиболее фундаментальным фактом, наблюдаемым сегодня на Земле, является ее разделение на ядро и мантию, которое представлялось им важным ограничительным условием. Астрономы же, исследовавшие образование Земли как одной из планет в Солнечной системе, факт существования слоистого строения некоторое время недооценивали, относя его к своего рода специфическому явлению, область распространения которого ограничена пределами Земли.

Пока оба подхода к проблеме образования Земли не сталкивались друг с другом, была возможность получать выводы, рассматривая то или иное явление либо как чисто геологическое, либо как сугубо астрономическое. Однако в последние десятилетия, в связи с прогрессом космических исследований Луны и планет, успехом прямых измерений их хи-

мического состава и развитием новой дисциплины — сравнительной планетологии, наметилось сближение обеих точек зрения на происхождение и развитие Земли. Поэтому современные представления о происхождении Земли основываются на рассмотрении ее как одной из планет Солнечной системы с учетом основных собственных свойств этой планеты.

Эти представления легли в основу различных теорий происхождения Земли, из которых рассмотрим здесь теорию, разработанную Чусиро Хаяши (об этой и других теориях см. предисловие.— *Прим. ред.*). Согласно теории Хаяши аккумуляция частиц была однородной (чтобы согласовать результаты с выводами механики формирования планет), но в ней участвовали раздельно сконденсировавшиеся частицы, главным образом железные и каменные. Таким образом, если ограничиваться масштабом частиц, составляющих протосолнечную систему, то она была неоднородной по составу. Однако эти частицы, как и все протосолнечное облако в целом, были хорошо перемешаны между собой, и поэтому формирующаяся в ходе аккумуляции планета была однородной.

Таким образом, если рассматривать макроскопически, то аккумуляция была однородной (этот пункт особо выделяется современными теориями). Однако образовавшаяся в результате такой однородной аккумуляции планета в принципе отличается от того, что понималось прежде под однородной планетой. Дело в том, что на микроскопическом уровне (порядка одного миллиметра) никелистое железо и силикаты уже разделились. Поэтому отпали трудности с объяснением вы-

деления огромных количеств кислорода при восстановлении железа из силикатов, а образование железо-никелевого ядра свелось к механическому процессу.

Помимо всего прочего, теория Хаяши предполагает, что первоначальная Земля должна была иметь первичную атмосферу из толстого слоя газа протосолнечной туманности. Однако современная атмосфера Земли может иметь вторичное происхождение, образовавшись газами, выделившимися из земных недр (об этом будет сказано далее). В теории же Хаяши эта мощная первичная атмосфера давлением несколько сот атмосфер имеет важное значение для последующей эволюции Земли.

Хотя последние исследования, касающиеся происхождения Земли и Солнечной системы, значительно, и это не будет преувеличением, расширили наши представления, многое здесь еще остается загадочным. Что же касается вопроса о том, образовалась ли Земля в процессе неоднородной или однородной аккумуляции, то даже на него, как мы знаем, ответить пока трудно. Между тем в зависимости от того, какую из этих двух теорий мы примем, выводы о ходе эволюции Земли будут очень сильно различаться.

Как бы то ни было, но правильной может быть только одна из теорий. И нам представляется, что такой теорией является та, согласно которой первоначальная Земля была макроскопически однородной, но вещество в ней микроскопически уже стало неоднородным. Этого мы и будем придерживаться дальше.

Проблема магнитного поля Земли

В настоящее время большинство исследователей считают, что земное ядро выделилось из почти однородной (макроскопически) Земли уже после ее формирования. Эта (пока еще!) гипотеза хорошо объясняет многие данные как сравнительной планетологии, так и наук о Земле. Хотя, конечно, на сегодняшний день нет решительных доказательств против предположения об образовании ядра одновременно с процессом аккумуляции.

Но в какой же момент вероятнее всего образовалось ядро Земли?

Оказывается, на этот-то вопрос можно дать сейчас довольно определенный ответ. И он связан с информацией о геомагнитном поле. Земля имеет магнитное поле, напряженность которого у ее поверхности составляет 0,5 гаусс. Это поле аналогично магнитному полю, создаваемому стержневым магнитом в центре Земли, наклоненным к ее оси вращения (такое поле называют дипольным).

Вопрос, почему возникло магнитное поле Земли, является одним из наиболее интригующих в геофизике. В попытке ответа на него было выдвинуто немало гипотез, и все они единодушны в том, что существование геомагнитного поля связано с движениями, возникающими в жидкой части ядра Земли. Этот механизм генерации магнитного поля в железо-никелевом расплаве (обладающим высокой электропроводностью) подобен, например, тому, который возникает в динамо-машине при продолжительном пропускании через нее тока. Такая гипотеза была выдви-

нута в 1949 году Е. Баллардом из Кембриджа (Великобритания).

Глубокая связь между магнитным полем Земли и движениями внутри жидкого ядра стала очевидной из наблюдений за изменениями (вариациями) земного магнитного поля. Вообще говоря, магнитное поле Земли считается в целом постоянным, но в геологических масштабах времени оно подвержено сильным вариациям. Наблюдения за геомагнитным полем начались всего лишь около 100 лет назад, но уже за этот период его интенсивность, снижаясь почти по линейному закону, уменьшилась на 6%. Если бы его интенсивность уменьшалась бы и дальше в таком же темпе, то менее чем за 2000 лет она стала бы равной нулю.

Кроме того, довольно сильным вариациям подвержена и ориентация магнитного поля Земли. Если бы геомагнитное поле было бы связано с твердыми породами земных недр, то чрезвычайно трудно было бы объяснить такую быструю изменчивость поля. Ведь не могут же в самом деле огромные массы пород перемещаться в темпе вариаций геомагнитного поля.

Теория геомагнетизма, прошедшая долгий путь развития с момента появления первой статьи Балларда до наших дней, пытается сейчас выяснить, какой конкретный характер имеют движения внутри жидкого ядра Земли, генерирующие геомагнитное поле. Вначале предполагалось, что ими могут быть лишь крупномасштабные движения, охватывающие все ядро в целом (точнее, всю его внешнюю часть, находящуюся в жидком состоянии). Однако со временем стало ясно, что только

крупномасштабными движениями трудно объяснить стабильность геомагнитного поля в целом. В настоящее время предполагается, что поддерживающими геомагнитное поле являются мелкомасштабные и хаотические (или, как говорят, стохастические) движения в ядре. А энергетическим источником, приводящим в движение вещество ядра, может быть радиоактивный распад элементов, содержащихся в ядре.

Для генерации геомагнитного поля необходимо наличие у Земли жидкого железоникелевого ядра, поскольку электропроводность неметаллизированных расплавленных пород невелика (см. сноску 17 на стр. 71). Следовательно, если бы для какого-нибудь момента в прошлом удалось достоверно установить факт существования геомагнитного поля, то можно было бы заключить, что в то время ядро Земли по составу было уже близко к современному.

Остаточная намагниченность пород

Факт существования в прошлом геомагнитного поля устанавливается по сохранившейся остаточной намагниченности пород Земли. Вулканические породы, образующиеся при застывании магмы, излившейся на земную поверхность, намагничиваются с той ориентацией, которую имело в этом месте геомагнитное поле. Это явление называется тепловой остаточной намагниченностью.

Тепловая остаточная намагниченность очень устойчива. Как экспериментально установлено, при обычных температурах она может сохраняться сотни миллионов лет, поч-

ти не уменьшаясь и не изменяя ориентации поля. Следовательно, если удастся установить в древних породах существование устойчивой тепловой остаточной намагниченности, можно будет сделать вывод, что в момент извержения этих вулканических пород уже существовало геомагнитное поле и у Земли имелось железо-никелевое ядро.

Остаточная намагниченность свойственна почти всем без исключения исследовавшимся образцам пород. Однако часто было довольно трудно определить, образовалась ли эта намагниченность под влиянием магнитного поля Земли, существовавшего при образовании породы, или она является вторичной, не связанной с застыванием магмы, из которой порода образовалась.

Обычно, чтобы различить первичную и вторичную намагниченности, берут образец вулканической породы и, нагрев его (примерно до 600°C), пробуют навести в нем искусственную намагниченность от современного геомагнитного поля. Взяв затем два образца, с искусственно наведенной и с природной остаточной намагниченностями, проводят их размагничивание путем нагревания в изолированном от внешнего магнитного поля пространстве. Если размагничивание обоих образцов при нагревании происходит одинаковым образом, можно считать, что природная намагниченность пород является тепловой остаточной намагниченностью.

Сравнение искусственно созданной намагниченности с естественной (природной) тепловой остаточной намагниченностью пород дает информацию об интенсивности геомагнитного поля в момент образования этих по-

род. Ведь величина тепловой остаточной намагниченности пропорциональна интенсивности внешнего магнитного поля, в данном случае магнитного поля Земли. Следовательно, и отношение величин намагниченности, искусственно созданной под влиянием современного магнитного поля Земли и созданной в естественных условиях под влиянием поля той эпохи, когда образовалась данная порода, равно отношению интенсивностей магнитных полей.

Древнейшими из известных в настоящее время магматических пород, имеющих устойчивую тепловую остаточную намагниченность (относящуюся, несомненно, ко времени их образования), являются найденные в Африке габбровые породы комплекса Модипе, возраст которых составляет 2,6 миллиарда лет. Установлено, что интенсивность геомагнитного поля, существовавшего во время образования этих пород, была почти равной интенсивности современного поля. Таким образом, изучение намагниченности габбровых пород Модипе позволило заключить, что еще 2,6 миллиарда лет назад уже имелось геомагнитное поле, почти одинаковое с современным, и следовательно, у Земли существовало ядро, близкое по размерам и состоянию к современному.

Наиболее древние породы из известных в настоящее время на Земле имеют возраст 3,6—3,7 миллиарда лет. Они на 1 миллиард лет древнее габбровых пород Модипе, но породы такого возраста почти всегда являются метаморфическими. Для пород, подвергшихся метаморфизму, время возникновения намагниченности определить не так просто¹⁸. Кро-

ме того, остаточная намагниченность метаморфических пород часто является неустойчивой. Поэтому относительно метаморфических пород, имеющих остаточную намагниченность, было бы опрометчиво делать вывод, что во время их образования уже существовало геомагнитное поле.

С другой стороны, в древних метаморфических породах с возрастом 3,6—3,7 миллиарда лет имеется чрезвычайно устойчивая остаточная намагниченность. И в настоящее время, когда у нас нет достоверных свидетельств в пользу существования в то время геомагнитного поля и, следовательно, железо-никелевого ядра Земли, этот факт является достаточным, чтобы сделать такое предположение.

Подводя итоги, можно сказать следующее. Наличием тепловой остаточной намагниченности пород достоверно установлено, что 2,6 миллиарда лет назад уже существовало геомагнитное поле и ядро Земли, подобное современному. Более того, с несколько меньшей степенью уверенности существование ядра и магнитного поля Земли может быть отнесено ко времени 3,7 миллиарда лет назад. Наконец, некоторые теоретические расчеты

¹⁸ Метаморфизмом называют процесс существенного изменения преимущественной ориентации кристаллов (текстуры), структуры и исходного минерального (а часто и химического) состава пород под действием температур, давлений и химической активности глубинных насыщенных газами растворов (к метаморфизму, например, не относят изменения пород при горообразовании). При метаморфизме возможно и изменение намагниченности пород, и поэтому возраст намагниченности метаморфической породы связан, как правило, с временем метаморфизма, а не с эпохой образования исходной породы.— *Прим. ред.*

указывают, что ядро Земли, видимо, образовалось вскоре после ее формирования (вероятно, спустя несколько сот миллионов лет).

Выделение земной коры из мантии

До сих пор в этой главе обсуждалось, как в образовавшейся при однородной аккумуляции Земле формировалось ядро. Вся оставшуюся часть Земли после возникновения в ней ядра составляла мантия, хотя несколько отличающаяся от той, которая известна нам сегодня. Главное отличие заключается в том, что в современной Земле с внешней стороны от мантии расположена кора.

Как мы узнаем в следующей главе, выделение коры из мантии происходило постоянно на протяжении всего существования Земли. Непрерывно выделяя вещество земной коры, мантия тем самым также подвергалась преобразованию. По этой причине формирование коры и эволюции мантии необходимо рассматривать как одно целое, чего мы и будем придерживаться дальше.

Возможности прямого изучения мантийного вещества весьма ограничены, поэтому сначала давайте сделаем попытку установить вид эволюции системы кора—мантия по гораздо более доступным нам породам земной коры, определив сначала абсолютный возраст пород, участвующих в ее образовании. Однако при таком способе ознакомления с историей коры очень большая роль отводится правильному выбору образцов для анализов.

Собранные образцы должны верно отражать реально существующие в природе количественные соотношения между различными

типами пород и их пространственное распределение. Например, если ограничить район отбора образцов только Японскими островами, можно проследить лишь отрезок истории Земли, не превышающий последние 500 миллионов лет (как исключение, в очень небольших масштабах встречаются породы возрастом до 1,5 миллиарда лет). Кроме того, отбор образцов, правильно отражающих историю формирования коры, в действительности является чрезвычайно трудной задачей, и поэтому способ прослеживания истории коры по данным о возрасте слагающих ее пород на самом деле малоэффективен.

Самые древние породы земной коры

Говоря о том, что с помощью изучения абсолютного возраста пород земной коры трудно проследить историю формирования коры в целом, необходимо отметить важное значение этих исследований для выяснения ряда частных вопросов. В качестве примера здесь можно рассмотреть данные о самых древних породах земной коры.

Наиболее древними из известных в настоящее время пород земной коры являются метаморфические породы, обнажающиеся на западном побережье Гренландии. Считают, что им около 3,7 миллиарда лет. Кроме того, метаморфические породы возрастом 3,6—3,7 миллиарда лет найдены на территории штата Миннесота в США. Эти породы указывают, что 3,7 миллиарда лет назад кора, без сомнения, уже существовала. Однако до какой степени сохранилась на Земле древняя кора, пока недостаточно ясно.

Измерение абсолютного возраста горных пород является одним из центральных вопросов геохронологии, которая будет темой отдельной главы. После того как в 50-х годах впервые был разработан заслуживающий доверия способ определения абсолютного возраста пород, рекорд «древности горных пород» стал обновляться ежегодно. Положение было таким, что если в предыдущем году находили породу возрастом 1,5 миллиарда лет, то в текущем обнаруживались породы возрастом 2 миллиарда лет. Однако после открытия в начале 60-х годов вблизи Верхнего озера (Канада) метаморфических пород возрастом около 3 миллиардов лет этот новый рекорд «древности» устоялся надолго. Единственная после этого поправка к рекорду была сделана в начале 70-х годов, когда определение времени образования метаморфических пород из Гренландии одним махом увеличило наибольший возраст сразу на 700 миллионов лет.

С тех пор, хотя измерения абсолютного возраста пород во всем мире проводятся интенсивно, в настоящее время, спустя около 10 лет после открытия метаморфических пород Гренландии, их рекорд все еще остается непобитым. Но по одному тому, что метаморфические породы Гренландии, по-видимому, действительно являются самыми древними из существующих пород земной коры, было бы опрометчиво сделать вывод о начале образования земной коры именно в то время. С одной стороны, не исключено, что мы еще не умеем как следует искать древние породы, а с другой — быть может, рекорд «древности» пород 3,7 миллиарда лет имеет важный, скрытый пока от нас смысл.

Например, можно предположить, что породы, образовавшиеся раньше, чем 3,7 миллиарда лет назад, совершенно исчезли в результате многократно повторявшихся эпизодов горообразования и вулканической деятельности. Такой возможной причиной полного уничтожения древних пород могла быть встреча Земли с грандиозным метеоритным потоком: Действительно, большая часть наблюдаемых на поверхности Луны кратеров является впадинами от падения метеоритов, образовавшимися, как считают некоторые ученые, при выпадении на Луну сильнейшего метеоритного потока 3,9—4,0 миллиарда лет назад. Если рассуждать так, то предположение, что земная кора существовала ранее, чем 3,7 миллиарда лет назад, вполне уместно.

Допустим же, что формирование земной коры началось около 3,7 миллиарда лет назад. При этом возникает вопрос, не была ли земная кора некоторых молодых горных систем (например, Гималаев, формирование которых началось самое большее несколько десятков миллионов лет назад), на первый взгляд выглядящая как вновь образовавшаяся, на самом деле лишь переработанной древней корой? И наоборот, что если древняя кора, образовавшаяся 3,7 миллиарда лет назад, составляет только небольшую часть современной земной коры, формировавшейся непрерывно в течение всего времени существования нашей планеты?

Эти одни из наиболее фундаментальных вопросов в изучении истории Земли в течение долгого времени были предметом ожесточенной дискуссии среди ученых, специализирующихся в области наук о Земле.

ГЛАВА IV ЭВОЛЮЦИЯ МАНТИИ

Изотопный состав стронция

Итак, наиболее древние породы земной коры имеют возраст по меньшей мере 3,7 миллиарда лет. Однако, основываясь лишь на изучении возраста пород, мы не можем ответить на вопрос, вся ли земная кора образовалась 3,7 миллиарда лет назад или только ее незначительная часть. Для того чтобы исследовать эту задачу, необходимо применить методы изотопной геохронологии.

Рассмотрим изотопный состав стронция, который относится к группе так называемых щелочноземельных элементов. И по своим свойствам он очень похож на элементы этой же группы магний и кальций. Природный стронций состоит из четырех изотопов с массовыми числами 88, 87, 86 и 84. Относительное содержание в нем изотопов стронций-88, стронций-86 и стронций-84 всегда остается постоянным, а вот количество стронция-87 зависит от типа породы и геологических условий. Последнее связано с тем, что часть стронция-87 образуется при распаде рубидия-87. В результате породы и минералы, содержащие большое количество рубидия, бывают обогащены изотопом стронций-87.

Что касается рубидия, то он, подобно калию и натрию, принадлежит к группе щелочных металлов. Природный рубидий состоит из двух изотопов с массовыми числами 87 и 86. Относительное содержание этих изотопов очень постоянно и равняется соответственно 27,83 и 72,17%. Разумеется, постоянство

процентного состава относится только к измерениям, сделанным в одну эпоху. С течением времени, в результате того что количество рубидия-87 уменьшается из-за радиоактивного распада, это соотношение меняется.

Период полураспада рубидия-87 составляет 48,8 миллиарда лет. Содержание элементов, подверженных радиоактивному распаду, вообще говоря, изменяется по экспоненциальному закону. Однако в случае рубидия-87, поскольку его период полураспада очень велик по сравнению с возрастом Земли, уменьшение количества этого изотопа можно считать происходящим фактически по линейному закону.

Стронций в мантии

До образования Земли изотопный состав стронция практически не менялся по сравнению с образовавшимся в ходе реакций нуклеосинтеза. Этот состав можно определить из анализа минералов в метеоритах, почти не содержащих рубидия. Отношение содержания стронция-87 к содержанию стронция-86, определенное в обогащенных кальцием минералах метеорита Алленде, оказалось равным 0,69 877. Если принять это изотопное отношение в качестве начального в только что возникшей мантии, то отсюда можно сделать ряд выводов о дальнейшей ее эволюции.

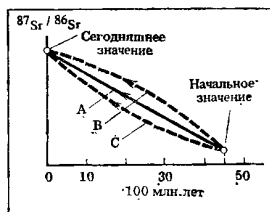
В мантии, конечно, также содержится рубидий. Следовательно, с течением времени количество стронция-87 должно было увеличиваться в результате распада рубидия-87 и одновременно расти изотопное отношение стронция-87 и стронция-86. Поскольку же ру-

бидий-87 имеет чрезвычайно длительный период полураспада, это увеличение практически пропорционально времени эволюции (прямая линия А на рис. 7).

Однако такое линейное увеличение изотопного отношения для стронция ожидается в том случае, если рубидий и стронций не выходят из мантии и не поступают в нее, то есть, другими словами, когда мантия является «замкнутой» системой. А как должно было изменяться изотопное отношение стронция, если мантия «открытая» система и в ней происходит непрерывный обмен веществом с внешней средой, содержащей рубидий и стронций?

В общем случае, как показывают расчеты, у такой «открытой» системы изменение изотопного отношения стронция со временем станет графически описываться некоторой кривой. Рассматривая в предыдущей главе формирование коры, мы говорили о том, что она образовалась за счет вещества мантии. Вопрос, который нас тогда интересовал, был связан с тем, произошла бы такая дифференциация коры из мантии в форме кратковременного процесса в самом начале истории

Рис. 7. Изменение изотопного отношения стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)



Земли или же она происходила непрерывно на протяжении всего времени существования нашей планеты.

Рассмотрим теперь этот вопрос, предполагая, что обмен мантии веществом с внешней средой происходит путем лишь перемещения (миграции) вещества из мантии в кору. В этом случае, если рубидий будет выноситься из мантии быстрее, чем стронций, то изменение изотопного отношения стронция со временем графически изобразится кривой, обращенной выпуклостью вверх (кривая *B* на рис. 7.). Если, наоборот, стронций из мантии выносится быстрее, кривая изотопного отношения должна быть обращенной выпуклостью вниз (кривая *C* на рис. 7.).

Непрерывность дифференциации мантии

Что же об этом говорят фактические данные?

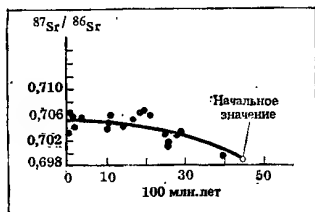
На рис. 8 по вертикальной оси дается изотопное отношение стронция, определенное в вулканических породах, собранных в различных уголках света, по горизонтальной оси — время извержения этих пород. При этом вычисление изотопного отношения проводилось после вычитания из количества стронция-87 той его доли, которая образовалась за счет распада рубидия (уже после кристаллизации пород). Таким образом, изотопные отношения стронция, приведенные на рис. 8, соответствуют времени извержения этих пород.

Типичными представителями вулканических пород являются базальты. Они образу-

ются при застывании излившейся на поверхность Земли магмы, получающейся при частичном плавлении мантийного вещества. В зависимости от того, какой степени достигало такое плавление, образуются базальты различных типов¹⁹. Однако можно сказать, что в любом случае изотопный состав становится чрезвычайно однородным, поскольку в момент плавления магма хорошо перемешивается, а изотопы химически ведут себя абсолютно одинаково. Следовательно, допустимо предположить, что изотопное отношение стронция в обломках базальтов, собранных на поверхности Земли, довольно хорошо отражает соответствующее значение для самой мантии.

Таким образом, можно заключить, что данные, представленные на рис. 8, показывают изменение изотопного отношения стронция со временем в самой мантии. Тогда, срав-

Рис. 8. Изменение изотопного отношения стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) в вулканических породах



¹⁹ Вообще говоря, состав излившихся базальтов зависит не столько от степени частичного плавления, сколько от температуры и давления, выплавки, характера воздействия летучих соединений (воды, углекислого газа), последующей дифференциации в приповерхностных очагах и т. д. — *Прим. ред.*

нивая рис. 7 и 8, с очевидностью получаем, что фактические данные, относящиеся к миграции мантийного вещества, указывают на более быстрый вынос рубидия из мантии, чем стронция (кривая *B* на рис. 7). Этот вывод, полученный при изучении изотопного отношения стронция, очень хорошо согласуется с данными других наук о Земле.

Проще всего предположить, что образование земной коры происходит при застывании магмы, поднимающейся из мантии на поверхность Земли. Эта гипотеза, помимо прочего, тесно связана с утверждением о непрерывности образования коры. Как показывают расчеты, если образование магмы идет за счет частичного плавления мантийного вещества, то при возникновении базальтов расплавлению должно быть подвергнуто 5—10% вещества мантии.

При таком частичном плавлении происходит разделение элементов в зависимости от степени их ассимилирования (поглощения) магмой. На основании некоторых упрощенных предположений можно сделать вывод, что в первую очередь из кристаллической решетки мантийных минералов магма будет ассимилировать те элементы, которые имеют больший ионный радиус. Ионные радиусы рубидия и стронция равны соответственно 0,152 и 0,118 нанометра, то есть у рубидия гораздо больше. Следовательно, можно предположить, что во время частичного плавления вещества мантии и последующего образования магмы рубидий будет поглощаться ею с большим предпочтением, чем стронций.

Транспортировку вещества из мантии к поверхности Земли можно сравнить с движени-

ем пассажирского экспресса, в качестве которого служит магма. Количество мантийного вещества, перешедшего в магму, определяется количеством мест в этом экспрессе. Входящие в мантийное вещество рубидий и стронций — это пассажиры, стремящиеся попасть на поезд. Однако вероятность того, что рубидий или стронций получит билет, зависит от распределения вероятностей (так называемой функции распределения) пребывания этого элемента-«пассажира» в твердой фазе (в мантии, то есть вне экспресса) и жидкой фазе (в магме, то есть в экспрессе). Эта функция распределения более благоприятна для рубидия, который имеет бóльшую вероятность приобрести билет и, естественно, с большей скоростью перемещается из мантии к земной коре.

Подобные функции распределения для различных химических элементов указывают, как они распределяются в случае одновременного своего существования в твердой и жидкой фазах при частичном плавлении вещества. Экспериментальное получение таких распределений является одной из основных задач кристаллохимии.

Изотопное отношение неодима

Результаты, схожие с приводившимися данными по стронцию на рис. 8, получаются при изучении изотопных отношений других элементов, подверженных радиоактивному распаду. Одним из таких элементов является неодим, принадлежащий к группе редкоземельных элементов. Он имеет семь изотопов, один из которых, неодим-143, частично

образуется при распаде самария-147, также принадлежащего к группе редкоземельных элементов. Самарий-147 имеет период полураспада в 100 миллиардов лет, то есть еще более длительный, чем у рубидия-87. Поэтому самарий может играть роль рубидия при изучении изотопного отношения неодима. Правда, следует отметить, что данные изучения изотопного отношения неодима довольно ограничены.

Если изобразить известные до сих пор результаты измерения состава неодима в вулканических породах, отложив по вертикальной оси, подобно тому как это было сделано на рис. 8, изотопное отношение для изотопов неодима-143 и неодима-144, то в отличие от случая стронция полученная кривая будет обращена выпуклостью вниз, как кривая *C* на рис. 7. Как мы знаем, кривая *C* на рис. 7 соответствует случаю, когда стронций перемещается из мантии в земную кору с более высокой скоростью, чем рубидий. Следовательно, данные по изотопному отношению неодима указывают, что в данном случае неодим должен мигрировать из мантии к коре с более высокой скоростью, чем самарий.

Этот вывод полностью согласуется с результатами, полученными из геохимии. Как установлено экспериментально, неодим легче поглощается магмой, чем самарий.

Подобные результаты (недобавляющие, однако, ничего нового по сравнению с уже изложенными) получены при изучении изотопного отношения свинца. Таким образом, изотопные составы стронция, неодима и свинца свидетельствуют в пользу того, что земная кора формировалась за счет вещества,

поступающего из мантии, на протяжении почти всего времени существования Земли.

Происхождение гранитов

В первой главе гранит был назван одной из наиболее распространенных пород земной коры. Как уже указывалось, химический состав земной коры соответствует составу смеси из гранитов и базальтов, взятых в пропорции 1 : 3. Но поскольку, как мы знаем, земная кора формировалась непрерывно на протяжении существования Земли, не означает ли это, что и граниты тоже непрерывно поднимались из мантии в кору?

Оказалось, что ответить на этот вопрос не так-то просто. Хотя гранит и чрезвычайно широко распространен, попытка выяснить, где образовались граниты, стала семенем, из которого взошла крайне ожесточенная и длительная дискуссия между геологами и петрографами, изучающими состав и происхождение пород Земли.

Гранит обычно содержит до 5% калия. С другой стороны, как полагают, содержание калия в мантии не превышает нескольких сотых долей процента. Если теперь представить, что граниты, как и базальты, образовались из магмы, поднимающейся к земной поверхности из мантии, то для образования магмы, содержащей 5% калия, необходимо расплавить в 500 раз больше количества мантийного вещества, чем входит в магму. Вспомним о том, как много гранитов в земной коре, и станет ясно, что количество магмы должно быть таким же огромным.

Таким образом, проблема происхождения

гранитов чрезвычайно усложнилась, когда мы предположили, что они исходят из мантии. Но если допустить, что граниты образуются в процессе перекристаллизации уже сформировавшихся пород в коре, то эту проблему, вообще говоря, удастся решить. Это связано с тем, что средний состав пород коры ближе всего именно к гранитам.

Однако в этом случае вступает в противоречие с действительностью модель непрерывного образования земной коры за счет вещества, поступающего из мантии, построенная по изотопным отношениям стронция и других элементов. Возникает также вопрос, что же тогда, вообще говоря, считать возрастом гранитов?

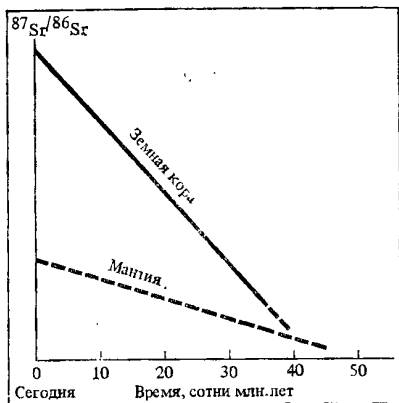
При ответе на него вновь оказалось очень полезным изотопное отношение стронция. Калия и рубидия в мантийном веществе очень мало по сравнению с веществом коры. Это в некоторой степени можно установить при анализе обломков мантийного материала, встречающихся в виде случайных примесей в вулканических породах. Используя, кроме того, результаты сопоставления с метеоритами (в обычных хондритах содержание калия составляет несколько сотых долей процента), значение теплового потока через земную поверхность и другую информацию, можно оценить содержание калия в современной мантии равным 0,01—0,03%.

Как уже говорилось, рубидий и калий принадлежат к одной и той же группе щелочных металлов и имеют весьма схожие химические свойства. Следовательно, в породах, включающих большое количество калия, содержание рубидия должно быть также велико. Однако

независимо от типа пород отношение содержания калия и рубидия обычно составляет 100—500. Можно поэтому предположить, что в мантии, где по сравнению с земной корой мало калия, содержание рубидия тоже будет невысоким. Поскольку рубидий-87, распадаясь, образует стронций-87, в обогащенной рубидием коре должно, видимо, происходить более быстрое накопление стронция-87, чем в мантии. Поэтому изотопное отношение стронция в коре по сравнению с мантией должно увеличиваться гораздо быстрее. Эта ситуация наглядно изображена на рис. 9.

Давайте вернемся к гипотезе о вторичном происхождении гранитов. Будем согласно ей считать, что граниты образовались из вещества земной коры. Тогда изотопное отношение стронция для гранитов должно быть похоже на то, которое показано сплошной

Рис. 9. Изменение изотопного отношения стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) в коре и мантии



линией на рис. 9 (на горизонтальной оси отложен возраст гранитов). Изотопное отношение стронция для гранитов, имеющих мантийное происхождение, показано на рис. 9 пунктирной линией. В последнем случае изотопное отношение стронция должно быть гораздо меньшим, чем в первом.

Изотопное отношение, существовавшее в момент образования гранита, называется изотопным отношением кристаллизации. По этим отношениям можно составить довольно четкое представление о месте возникновения гранитов. Изотопное отношение кристаллизации в этом смысле можно сравнить с записью на генеалогическом древе в родословной аристократа.

При определении изотопного отношения кристаллизации сначала измеряют существующее изотопное отношение стронция в граните. Затем, после определения возраста гранита и содержания в нем рубидия, из этого значения вычитают долю стронция, образовавшегося после возникновения гранита.

В 60-х годах, после того как появилась возможность точно определять изотопные отношения стронция, геохронологами всего мира было проведено очень большое число измерений изотопных отношений кристаллизации этого элемента. И если посмотреть на полученные к настоящему времени результаты, станет очевидно, что большей части исследованных гранитов соответствуют низкие значения изотопных отношений кристаллизации (0,703—0,706) и лишь небольшой части — высокие (0,710 и более). Таким образом, если основываться на изотопных отношениях кристаллизации, можно считать, что большая

часть обнажающих на поверхности Земли гранитов поднималась непосредственно из мантии. С другой стороны, и граниты, образовавшиеся из уже существовавших пород земной коры, по-видимому, тоже не являются исключением.

Итак, было установлено, что довольно значительная часть гранитов поднялась в земную кору из мантии. Результаты изучения изотопного отношения стронция оказались совершенно несовместимыми с предположением о том, что породы современной земной поверхности возникли при перекристаллизации древней земной коры, образовавшейся целиком на ранних стадиях существования нашей планеты. Скорее всего, земная кора все-таки образовывалась непрерывно — на протяжении всей истории Земли.

ГЛАВА V ХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ ШКАЛА ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Как измерить миллиард лет?

В этой книге мы часто упоминали о возрасте Земли в 4,5 миллиарда лет, о возрасте самых древних пород. Но каким же образом была разработана шкала времени, являющаяся, без преувеличения сказать, становым хребтом изучения истории Земли? В этой главе мы, стараясь не выходить за пределы наших представлений и повседневного опыта, поведем разговор о способах измерения продолжительности невероятно длительных геологических эпох.

В целом можно сказать, что принцип измерения времени одинаков и в случае геологических эпох и в повседневной жизни, однако для геологического времени, из-за его невообразимой длительности, возникает ряд серьезных проблем. Из них первая по важности заключается в следующем. Геологические «часы» должны гарантировать постоянство своего хода в течение нескольких миллиардов лет. Жизнь человека может длиться в лучшем случае несколько больше 100 лет, если же говорить о человечестве в целом, то его история не заполнит и миллиона лет. Пусть теперь мы обнаружили подходящие геологические «часы» и удостоверились в правильности их хода в пределах человеческой жизни или даже всего человечества.

Но как проверить правильность их хода в течение времени, во много сотен тысяч раз превышающего доступные нам отрезки времени?

Чтобы понять всю серьезность данной проблемы, рассмотрим хотя бы проблему экстраполяции физических явлений. Например, чтобы понять внутреннее строение Земли, необходимо знать температуру и плотность вещества, находящегося в земном ядре под давлением в несколько миллионов атмосфер. Самый простой способ — это довести железо-никелевый расплав до давления в несколько миллионов атмосфер и измерить плотность и температуру плавления. Однако не существует пока такой аппаратуры, которая устойчиво бы поддерживала давление в несколько миллионов атмосфер. А если попытаться сделать выводы о свойствах вещества при давлении в несколько миллионов атмосфер, экстраполируя результаты опытов, проведенных при давлении в несколько сотен тысяч атмосфер, результаты оказываются очень ненадежными.

Но чего же тогда ждать от попытки установить хронологическую шкалу истории Земли, если при этом пределы измерения времени превышаются в сотни тысяч раз?

Кроме того, геологические «часы» могут действительно считаться часами только тогда, когда окружающая обстановка не оказывает совершенно никакого влияния на отсчет времени. Но ведь породы могут после извержения на земную поверхность в течение длительного времени подвергаться действию ветра и мороза или, кристаллизуясь, как гранит на больших глубинах, существовать при высоких температурах и давлениях. Очевидно, что часы, ход которых будет зависеть от таких изменений внешней среды, не могут считаться подходящими.

Таким образом, мы видим, что на геохронологию, составляющую основу изучения истории Земли, накладываются очень жесткие ограничения. Метод, который полностью удовлетворяет всем этим требованиям и дает геологические «часы» для измерения бескрайне длительных геологических эпох, связан с явлением радиоактивного распада, хорошо знакомым нам по предыдущему тексту.

Геохронология на основе радиоактивного распада

Как уже говорилось, уран и калий (точнее, изотоп калий-40) в результате радиоактивного распада в конце концов превращаются в совершенно иные элементы — соответственно в свинец и аргон. Скорость распада определяется величиной периода полураспада, имеющей специфическое значение для каждого элемента. Периоды полураспада изотопов уран-235, уран-238 и калий-40 лежат в интервале от 1 до 50 миллиардов лет.

При распаде число атомов N уменьшается по экспоненциальному закону, и поэтому скорость распада можно выразить очень простым соотношением: количество атомных ядер, которые распадаются за единицу времени $\Delta N/t$, пропорционально числу еще нераспавшихся ядер N с коэффициентом пропорциональности — λ , называемым постоянной распада. Иначе говоря, справедлива следующая формула:

$$\frac{\Delta N}{t} = -\lambda N.$$

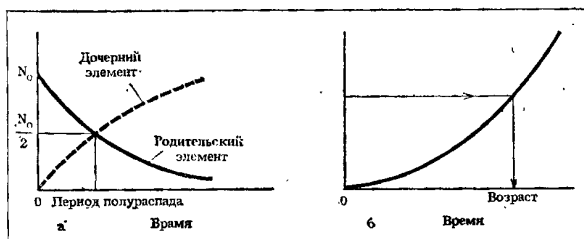
Следует отметить, что явление радиоактивного распада описывается этой формулой статистически, не учитывая особенности внутреннего строения атомных ядер.

На рис. 10, а показано изменение количественных характеристик ядерного распада со временем. С течением времени количество атомов родительских элементов (урана, калия-40 и т. д.) уменьшается по экспоненциальному закону, а количество образующихся из них дочерних элементов увеличивается по такому же закону. На вертикальной оси рис. 10, б отложена доля дочерних элементов относительно родительских (с течением времени это отношение быстро увеличивается).

Из всего сказанного легко сделать вывод, что вид кривой на рис. 10, б, а следовательно, и скорость распада целиком определяются постоянной распада: чем больше эта величина, тем быстрее происходит распад и тем круче будет кривая на рис. 10, б.

Рассмотрим теперь подробнее случай распада калия-40. В тот момент, когда излившаяся на поверхность Земли лава застывает, образуя базальты и другие вулканические породы, в ней (а следовательно, и в базальтах)

Рис. 10. Схема радиоактивного распада



содержится некоторое количество калия (обычно 0,1—1,0%). Можно считать, что газы, растворенные в жидкой лаве, полностью покидают ее в момент извержения. Следовательно, вполне допустимо предположить, что в образовавшейся породе сразу после извержения содержится некоторое количество калия-40 и совершенно отсутствует аргон-40.

С течением же времени содержащийся в породах калий-40 в результате распада будет превращаться в аргон-40. И хотя аргон является газом, он, будучи образованным внутри минерального вещества, будет прочно удерживаться в минералах кристаллической решеткой и не сможет «ускользнуть» из породы. Следовательно, отношение содержания дочернего элемента (аргона-40) к содержанию родительского элемента (калия-40) станет постепенно увеличиваться. Это увеличение будет происходить по закону, указанному на рис. 10, б. Пользуясь им, можно по значению отношения содержаний дочернего элемента и родительского (аргона-40 и калия-40) установить возраст пород (по горизонтальной оси).

Таким образом, чтобы определить возраст пород, достаточно провести количественный анализ содержания в них калия-40 и аргона-40. Обычно калия в породах содержится 0,1—1%. Среди этого калия на долю изотопа калий-40 приходится, как говорилось ранее, около 0,0117%. В результате весовая доля калия-40 в породах не превышает одной части на миллион. Количество аргона-40, образующегося, например по прошествии 10 миллионов лет, при распаде этого весьма небольшого количества калия, составит на один

грамм породы максимум одну десятимиллиардную долю грамма.

Обнаружение таких ничтожных доз вещества с помощью обычных методов химического анализа невозможно. Практически применяться этот способ определения возраста пород стал только во второй половине 50-х годов, когда начал использоваться метод количественного анализа, основанный на разделении изотопов с помощью масс-спектрометра. Таким образом, развитие методов геохронологии и, в частности, изотопной геохронологии теснейшим образом связано с прогрессом масс-спектрометрии.

Надежность геологических «часов»

Давайте повторим только что установленные нами основные принципы геологических «часов», использующих явление радиоактивного распада. Мы выяснили, что в случае, например, калия можно по соотношению содержаний родительского элемента, калия-40, и дочернего, аргона-40, однозначно установить время образования исследуемой породы. Это так называемый калий-аргоновый метод, получивший техническое воплощение около 1960 года и в настоящее время наиболее широко использующийся.

Современная геохронология, не исчерпывающаяся калий-аргоновым методом, основана на том, что скорость превращений элементов в результате радиоактивного распада уменьшается по экспоненциальному закону. Конкретные характеристики распада, в том числе постоянную распада, можно установить для тех или иных элементов путем лабо-

раторных исследований. Однако насколько эти характеристики свойственны эпохам, отстоящим от нас на несколько миллиардов лет, то есть на время, намного превосходящее продолжительность наших наблюдений?

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо обратиться к данным наук о Земле. Среди методов геохронологии, использующих радиоактивный распад, были, помимо калий-аргонового, предложены и реализованы на практике уран-свинцовый, рубидий-стронциевый и другие. С помощью этих методов проводилось большое число определений возраста пород. В частности, имеется довольно много случаев определения возраста одного и того же образца с помощью различных методов. При этом, за исключением образцов пород, подвергшихся очевидному выветриванию и определять возраст которых не имело смысла, все эти методы давали одинаковый возраст. Не наблюдалось отклонений ни в сторону «омоложения», ни, наоборот, в сторону «постарения» пород. Так, например, возраст метеоритов, измеренный уран-свинцовым и рубидий-стронциевым методами, в обоих случаях оказался равным 4,55 миллиарда лет.

Ядерный распад, помимо прочего, почти не подвержен влиянию внешней среды. Его законы остаются одними и теми же в таких экстремальных условиях, как на глубине в несколько сот километров под поверхностью Земли, где давление достигает 100 000 атмосфер, а температура — 2000 К, и при обычных температуре и давлении. Это означает, что ход геологических «часов» остается неизменным.

Итак, в нашем распоряжении оказались идеальные часы, не подверженные влиянию внешней среды, пригодные для измерения чрезвычайно длительных геологических эпох. Лежащий в их основе закон является, как уже отмечалось, статистическим и не связан непосредственно с внутренним строением атомов и ядер элементов. Этот тщательно проверенный закон настолько прост, что среди других физических законов выглядит поистине уникальным.

Закон радиоактивного распада был установлен в 1902 году Резерфордом и молодым выпускником Оксфордского университета химиком Содди, когда они проводили совместные исследования в одном из университетов города Монреаль (Канада). Значение открытия Резерфорда и Содди для дальнейшего развития наук о Земле было оценено довольно быстро. Надо отметить, что этот закон, конечно, не давал полного понимания явления радиоактивного распада. Несмотря на это, такие статистические законы могут оказаться чрезвычайно полезными.

Взять хотя бы, например, прогноз землетрясений, где мы еще не можем сказать, что полностью понимаем механизм этого явления. Однако на сегодняшний день уже имеется достаточно возможностей проводить разного рода статистические прогнозы относительно землетрясений, что уже является прогрессом. Можно также вспомнить, что и механизм возникновения рака еще не до конца понятен, но тем не менее статистика указывает на явный рост коэффициента излечения этой болезни, а такой статистический закон также имеет положительную сторону.

Калий-аргоновый метод

Поскольку калий широко распространен на Земле, калий-аргоновый метод может использоваться для изучения многих типов пород Земли. Это является немаловажным достоинством. Использование уран-свинцового метода, например, довольно существенно ограничено тем, что он может применяться только для гранитов и подобных им пород, содержащих значительное количество урана.

Кроме того, у калия-40 довольно короткий период полураспада — 1 миллиард лет, что значительно короче, чем, например, у рубидия-87 (48,8 миллиарда лет). Количество рубидия, подвергшегося распаду со столь длительным периодом полураспада, по прошествии 10 миллионов лет будет составлять 0,01%. Поскольку это количество очень мало, его весьма трудно обнаружить. По этой причине методы геохронологии, использующие распад ядер с большими периодами полураспада, не подходят для определения «малых» возрастов. Калий же, имеющий сравнительно короткий период полураспада, вполне подходит для этой цели.

В настоящее время применение рубидий-стронциевого метода (за исключением особых случаев, когда содержание рубидия чрезвычайно велико) ограничивается возрастом 10 миллионов лет. С другой стороны, калий-аргоновый метод позволяет получить довольно точные измерения возраста порядка нескольких сот тысяч лет. А если использовать минералы, очень обогащенные калием, такие, как санидин, становится возможным измерять возраст порядка нескольких десятков тысяч

лет. Для более коротких промежутков времени калий-аргоновый метод все-таки становится слишком неточным. Но в этом случае используется углерод-14, имеющий еще более короткий период полураспада (5730 лет).

В качестве примера успехов, достигнутых с помощью калий-аргонового метода, рассмотрим проведенную датировку инверсий магнитного поля Земли.

Инверсии магнитного поля Земли

Магнитное поле Земли является одним из главных героев, появляющихся на сцене земной истории. Ранее уже говорилось, что существование ядра Земли, как и его геомагнитного поля, прослеживается по крайней мере до 3 миллиардов лет назад.

Магнитное поле Земли, которое наблюдается сегодня, очень схоже с тем, которое создавал бы помещенный в центре Земли гигантский стержневой магнит, ориентированный вдоль линии север — юг. Точнее, этот стержневой магнит должен быть установлен так, чтобы его северный магнитный полюс был направлен на южный географический полюс Земли, а южный магнитный полюс — на северный географический.

Однако это отнюдь не является вечным и неизменным свойством магнитного поля Земли. Как удалось установить, в действительности направление (иначе говоря, полярность) геомагнитного поля с течением времени непрерывно меняется. И были периоды, когда стрелка магнитного компаса, если им тогда можно было бы воспользоваться, указывала бы на юг, а не на север.

На то, что полярность магнитного поля Земли различается в зависимости от геологической эпохи, впервые указал в начале нашего столетия французский ученый Б. Брюн. Изучая остаточную намагниченность вулканических пород Европы, Брюн обнаружил, что направление намагниченности некоторой части пород обратно направлению современного магнитного поля Земли. После того как Брюн сообщил результаты своих наблюдений, проводились многочисленные исследования, показавшие повсеместное распространение вулканических пород с обратной намагниченностью.

Первым из японских ученых, открывшим обратное направление намагниченности вулканических пород, подтверждающее возможность инверсий магнитного поля Земли, был профессор Токийского университета Мотонори Мацуяма (при этом он использовал породы, собранные на севере и юге Японии и на Корейском полуострове).

Это сейчас мы уже не так удивляемся, услышав об инверсиях магнитного поля Земли, а когда-то от передовых ученых требовалось проявить определенное мужество, чтобы от открытия обратного направления намагниченности пород прийти к утверждению об инверсиях всего геомагнитного поля в целом. Как бы там ни было, но была целая эпоха, когда «магнит» и «указывающий на север» означали одно и то же. Пожалуй, такую революцию во взглядах на законы природы можно сравнить только с переворотом, осуществленным Коперником.

Итак, благодаря проведенным вслед за сообщением Брюна повсеместным исследованиям вулканических пород была повсюду обна-

ружена остаточная намагниченность, ориентированная обратно современному магнитному полю Земли. Однако вопрос был очень серьезным, и поэтому только один этот факт не мог считаться доказательством существования инверсий, новых же свидетельств, подтверждавших бы такое заключение, долго не появлялось. Окончательно заставили поверить в существование инверсий геомагнитного поля результаты измерений возраста намагниченных пород с помощью калий-аргонового метода.

В начале 60-х годов начала свою деятельность группа исследователей, носившая название «Отдела теоретической геофизики», занимавшая один из углов Геологического института США, расположенного в тихом местечке, в 100 километрах к югу от Сан-Франциско. Отдел возглавлял Ричард Доуэлл, но весь персонал руководимого им отдела состоял лишь из Алана Кокса, к которому позднее присоединился Брендан Далримпл. Все трое были выпускниками геологического факультета Калифорнийского университета в Беркли (США). Эта группа поставила своей целью измерить в собранных по всему свету вулканических породах направление остаточной намагниченности и одновременно определить возраст этих пород калий-аргоновым методом.

Тема этих исследований выглядела сугубо академической, в ней не было потрясающих воображение новых идей, и тем не менее проведенные ими работы дали поразительные результаты, которые по своему значению заняли исключительное место в развитии наук о Земле. Поначалу, правда, ученым пришлось

столкнуться с рядом серьезных трудностей. Самой существенной из них была необходимость научиться точно определять время образования молодых вулканических пород, имеющих возраст от нескольких миллионов до нескольких сотен тысяч лет. К счастью, работавший на физическом факультете того же университета Джон Рейнольдс сумел создать масс-спектрометр, обладавший наиболее высокой в то время точностью. Используя этот прибор, группа Доуэлла смогла определять возраст молодых вулканических пород с точностью до 12%.

По мере накопления данных об остаточной намагниченности и возрасте вулканических пород стал постепенно вырисовываться облик магнитного поля Земли прошлых геологических эпох. Вулканические породы, извергшиеся не ранее 690 тысяч лет назад, почти все без исключения имели одинаковое направление намагниченности. Однако вулканические породы, образовавшиеся в период от 890 до 690 тысяч лет назад, были намагничены в совершенно противоположном направлении. Полярность остаточной намагниченности всех вулканических пород этой эпохи одинакова и не меняется в зависимости от пункта, где они были собраны.

После этого уже нельзя было особую намагниченность исследуемых пород объяснять тем, что поле в них «как-нибудь опрокинулось случайно». Одинаковость и повсеместность во времени такой смены полярности привели к очевидному выводу, что опрокинулось само магнитное поле Земли. Таким образом, существование инверсий магнитного поля Земли в прошлом окончательно было доказано бла-

годаря калий-аргоновому методу определения возраста пород.

После этого было собрано еще очень много данных и составлена подробная хронология инверсий геомагнитного поля.

Возраст осадочных пород

Хотя для пород докембрийской эпохи, не содержащих останков древней фауны, геологические «часы» являются единственным средством восстановления последовательности событий, это нисколько не отрицает значения традиционных палеонтологических методов.

Геологические «часы», использующие радиоактивный распад, почти не применимы, например, к осадочным породам. Последние представляют собой отложившиеся частицы вещества, образовавшиеся при разрушении различных более древних пород. Следовательно, если для таких пород механически использовать геологические «часы», полученный возраст будет не более чем средним из времен образования кристаллов, составляющих отдельные зерна, и не будет иметь никакого отношения ко времени отложения осадочных пород. Наиболее эффективный способ определения возраста осадочных пород состоит в использовании содержащихся в них окаменелостей (останков древних флоры и фауны).

Однако с помощью палеонтологических методов можно судить только о том, что один возраст предшествует другому, либо о равенстве возрастов, и ничего нельзя сказать об абсолютном возрасте. Для того, чтобы нанести на палеонтологическую шкалу несколько

временных отметок ²⁰, все равно приходится

²⁰ Палеонтологические методы, изучающие принцип последовательности напластования пород, устанавливают относительную геохронологическую шкалу, подразделяющуюся на различные отрезки времени: эоны, эры, периоды и т. д. С учетом ядерных методов, основанных на явлении радиоактивного распада, эта шкала выглядит следующим образом:

Эоны	Эры	Периоды	Начало периода, млн. лет назад	Продолжительность периода, млн. лет
Фанерозойский (продолжительность 570 млн. лет)	Кайнозойская (продолжительность 67 млн. лет)	Четвертичный	1,5*	1,5*
		Неогеновый	25	23,5
		Палеогеновый	67	42
	Мезозойская (продолжительность 163 млн. лет)	Меловой	137	70
		Юрский	195	58
		Триасовый	230	35
Криптозойский (продолжительность свыше 3 млрд. лет)	Палеозойская (продолжительность 340 млн. лет)	Пермский	285	55
		Каменноугольный	350	75—65
		Девонский	410	60
		Силурийский	440	30
		Ордовикский	500	60
		Кембрийский	570	70
Протерозой (продолжительность около 2 млрд. лет)				
Архей (продолжительность свыше 1 млрд. лет)				

* По разным данным от 600 тыс. до 3,5 млн. лет.

Огромный промежуток истории Земли от времени образования пород до наступления кембрийского периода, охватывающий около 4 миллиардов лет, называется докембрийской эпохой, которая и является основной темой обсуждения в этой книге.— *Прим. ред.*

опираться на геологические «часы», использующие радиоактивный распад.

При определении возраста осадочных пород с помощью геологических «часов» приходится прибегать к косвенному методу. При этом по геологическим признакам находят вулканическую породу, имеющую одинаковый относительный возраст с осадочной, а определив абсолютный возраст этой вулканической породы, присваивают его осадочной породе. Таким образом, возраст периодов и эпох палеонтологической хронологической схемы установлен на самом деле по абсолютному возрасту вулканических пород, образовавшихся с осадочными.

Этот факт обычно легко ускользает из внимания обеих сторон — палеонтологов и геохронологов. А ведь его всегда надо помнить, отвечая на вопрос, сколько лет назад был, например, меловой или каменноугольный период.

ГЛАВА VI

ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Докембрийская эпоха

Наиболее важным достижением, связанным с применением геологических «часов», использующих явление радиоактивного распада, было восстановление геологической истории докембрия. Хотя история Земли составляет единое целое, докембрийская эпоха, охватывающая $7/8$ и, может быть, большую часть ее протяженности, долгое время оставалась почти сплошным белым пятном.

Она практически не оставила после себя ископаемых останков древних организмов, служивших основным объектом исследований при восстановлении последовательности событий на ранних стадиях развития геохронологии. Новые геологические «часы» стали почти единственным средством для реконструкции этой эпохи.

Большую роль в этом сыграли ученые Геологического института Канады. С самого основания этого института изучение геохронологии докембрия стало одним из наиболее интенсивно разрабатываемых программ. Группа ученых во главе с Р. Уанлиссом провела систематическое изучение возраста докембрийских пород, обнажающихся по всей территории Канады. Вначале использовался главным образом калий-аргоновый метод, затем предпочтение стало отдаваться рубидий-стронциевому методу.

К 1967 году число определений возраста приблизилось к 1000. Обобщение данных, проведенное К. Стокуэллом, выявило чрезвычай-

чайно характерную картину. Оказалось, что значения возраста не распределяются непрерывно по всему интервалу докембрия, а концентрируются вокруг нескольких характерных значений. Стокуэлл, считая, что причиной такого характерного прерывистого распределения возрастов является дискретность орогенических (складкообразовательных) движений в земной коре, предложил основанную на этом геохронологическую шкалу (схему) докембрия. Он разделил докембрийскую эпоху континентальной части Канады на четыре периода.

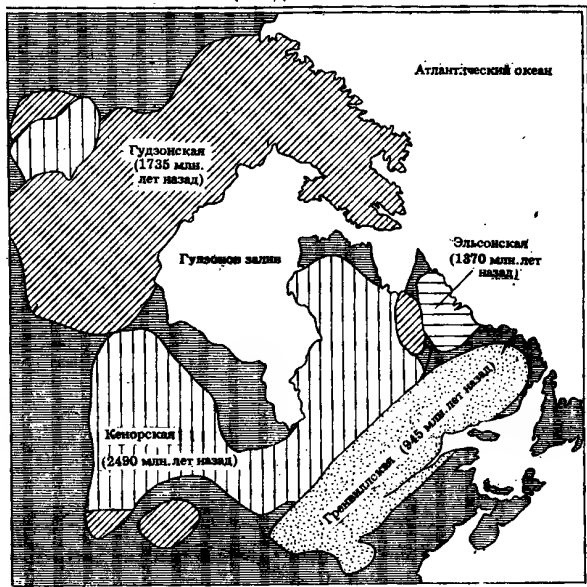
Пространственное распределение соответствующих им зон орогенеза показано на рис. 11. Возраст каждого такого орогенического цикла соответствует времени окончательного завершения процесса образования складчатости. Впоследствии Стокуэлл развил свою геохронологическую шкалу, используя дополнительно данные рубидий-стронциевого метода, однако в основном результаты остались близкими к изображенным на рис. 11. Эта геохронологическая шкала-схема используется в качестве стандартной для докембрия Канады (с добавлением некоторых исправлений в значениях возраста).

Итак, Стокуэлл провел разделение орогенических движений на эпохи (фазы складчатости), основываясь на возрасте пород. Однако оказалось, что эта геохронологическая шкала может быть использована только на том континенте, для которого она создана, и малопригодна в других районах мира. Действительно, ведь нельзя предполагать, что одновременно, например, с гренвиллской или гудзонской фазами складчатости Канады оро-

генические движения начинались также и на других континентах. Если сравнивать эту ситуацию с палеонтологией, то там такой ситуации быть не может, поскольку считается, что распространение фауны происходит очень быстро (в геологических масштабах) и одинаковые виды фауны должны существовать в одно и то же время во всем мире. Следовательно, выделив в каком-либо месте зону с определенной фауной, ее можно использовать для того же времени и в любом другом месте.

В результате сложилось такое положение, когда для каждого континента существует

Рис. 11. Схема докембрийских фаз складчатости Канады



своя собственная геохронологическая схема докембрия, основанная на возрасте орогенеза этих континентов²¹. Чтобы избежать неудобств, вызванных такой ситуацией, не прекращаются попытки разработать геохронологическую шкалу докембрия, обобщающую результаты, полученные во всем мире. Поскольку в основу такой шкалы нельзя положить фазы складчатости (как не имеющие повсеместного распространения), разработанные схемы используют только временные подразделения.

Следует отметить, что мысль о периодичности и всемирном характере фаз складчатости (и не только для докембрия) издавна высказывалась многими геологами. В 1964 году Р. Дирнлей, основываясь на 3000 определениях возраста пород, собранных по всему миру, построил график распределения возрастов, пытаясь выявить периодичность в возрастах и, таким образом, периодичность фаз складчатости. Он утверждал, что местные (локальные) фазы складчатости концентрируются вокруг некоторых значений возраста (например, 650 и 180 миллионов лет назад).

С тех пор количество данных по возрасту пород возросло на порядок, и стало почти безнадежным делом ожидать, что кто-нибудь попытается построить кривую распределения, аналогичную созданной в свое время Дирнлеем. Быть может, в будущем, если возникнет международный центр подобных данных, в задачу которого будут входить сбор и хранение проводимых во всем мире определений

²¹ В СССР, например, выделяют фазу Рифея (от древнего названия Урала), охватывающую промежуток времени от 570 до 1650 миллионов лет.— *Прим. ред.*

возраста пород, станет возможным, обработав их с помощью ЭВМ, выявить периодичность фаз складчатости. Замысел таких центров информации в области наук о Земле в настоящее время постепенно становится реальностью. Но на сегодняшний день проблема того, есть ли периодичность в протекании орогенеза, чем она вызвана и каков ее период, остается неясной.

Фазы складчатости докембрия

Благодаря исследованиям Стокуэлла стало очевидным, что в докембрии Каналы было четыре крупных фазы складчатости. Самой древней из них является начавшаяся 2,5 миллиарда лет назад очень бурная кеноранская фаза складчатости. Однако, как мы уже знаем, возраст древнейших пород земной коры простирается в прошлое еще на один миллиард лет дальше. Самые древние из известных в настоящее время пород — это метаморфические породы, обнажающиеся на западном побережье Гренландии. С помощью рубидий-стронциевого метода определено, что их возраст 3,7—3,8 миллиарда лет.

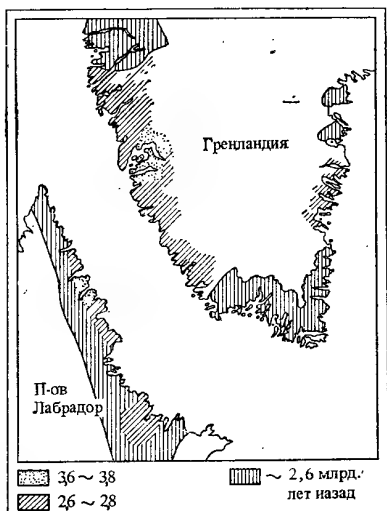
Поскольку же метаморфические породы всегда являются продуктом переработки других пород, ясно, что существовали исходные породы, более древние, чем образовавшиеся из них метаморфические. Таким образом, существование пород, образовавшихся ранее, чем 3,7 миллиарда лет назад, можно считать доказанным фактом.

Интересно отметить, что исходными для этих метаморфических пород являлись не только вулканические горные, но и осадочные

породы. Поскольку наличие осадочных пород указывает на существование гидросферы, можно сделать вывод, что последняя образовалась, по-видимому, ранее чем 3,8 миллиарда лет назад.

Исчерпывающее геохронологическое исследование древнейших пород докембрия было проведено группой ученых Оксфордского университета под руководством С. Мурбата. Итоговые результаты исследований Мурбата приведены на рис. 12. Самые древние из пород с отчетливо устанавливаемым возрастом — это гранодиориты, которые образовались 3,75 миллиарда лет назад. Возраст гранодиоритов с поразительной точностью определяется рубидий-стронциевым методом.

Рис. 12. Геохронология Гренландии



Впоследствии, подвергшись 3,7 миллиарда лет назад действию метаморфизма, гранодиориты превратились в гнейсы — один из видов метаморфических пород.

В гранодиоритах, являющихся исходной породой для гнейсов Амитсок (по названию места, где они обнажились), содержатся гальки вулканических и осадочных пород. Эти гальки были захвачены из окружающих пород в момент внедрения гранодиоритовой магмы, и поэтому они должны иметь более древний возраст. Следовательно, именно эти гальки являются наиболее древними из открытых на сегодня пород. После образования же гнейсов Амитсок в этом районе еще не раз возобновлялась вулканическая деятельность и протекали процессы метаморфизма.

Главным оружием при выяснении геологической истории Гренландии стал рубидий-стронциевый метод определения абсолютного возраста. Пользуясь этим методом, можно в случае метаморфических пород установить и возраст тех исходных пород, из которых образовались исследуемые породы. При этом сначала рубидий-стронциевый метод применяют для измерения времени образования отдельных минералов, входящих в состав пород (полученное значение называется возрастом минералов). Поскольку минералы в таких породах образуются в процессе метаморфизма, очевидно, что возраст минералов соответствует возрасту метаморфизма. Если же применить рубидий-стронциевый метод к породе в целом (на самом деле используют однородную смесь, полученную измельчением образца породы размером с голову человека до порошкообразного состояния), можно опреде-

лить время образования исходной породы, которая послужила материалом для метаморфической (это значение называется «возраст породы»).

Использование образцов такого размера связано с особенностями процесса метаморфизма. Дело в том, что при метаморфизме состав породы в целом не изменяется. При этом образование кристаллической решетки новых атомов в породе, остающейся в твердом состоянии. Поскольку расплавления пород не происходит, перемещения атомов, как считают, составляют не более нескольких миллиметров.

Древние породы Миннесоты

В Северной Америке известны почти столь же древние породы, как и гренландские. Ими являются гнейсы Монтевидео, найденные в штате Миннесота, расположенном в самом центре Североамериканского континента. По данным рубидий-стронциевого метода их возраст составляет 3,8 миллиарда лет. Однако в этом районе, по-видимому, неоднократно повторялся довольно сложный процесс метаморфизма. В результате образцы, отобранные почти из одного и того же места, имеют совершенно различный возраст.

Нам довелось отобрать и исследовать образцы, найденные совсем рядом с тем пунктом, где была обнаружена порода возрастом 3,8 миллиарда лет. Используя аргон-аргоновый метод (который является наследником калий-аргонового метода и обладает очень высокой точностью), мы получили значения возраста, охватывающие интервал 1—3 мил-

лиарда лет. При этом не обнаружилось влияния процесса метаморфизма. Кроме нас, геохронологические исследования гнейсов Монтевидео проводили еще в двух или трех лабораториях, но ни в одной из них не смогли подтвердить сообщение Гордичии о возрасте в 3,8 миллиарда лет.

Проводя геохронологическое изучение гнейсов Монтевидео, вновь и вновь испытываешь чувство удивления при мысли о том, что за 3,8 миллиарда лет им удалось избежать воздействия метаморфизма и тому подобных процессов. Ведь на расстоянии всего в 50 сантиметров возраст пород отличается уже на один миллиард лет!

Самыми древними из известных пород являются гальки, входящие в состав гнейсов, обнаруженных в Гренландии. Хотя точное значение возраста этих галек установить пока не удалось, несомненно, что они являются более древними, чем вмещающие их гнейсы (возраст которых 3,75 миллиарда лет).

Самые древние породы Японских островов

В настоящее время самый древний возраст из известных пород Японских островов имеют обнажающиеся в районе Хиды в префектуре Гифу конгломераты²² Ками-Асо, точнее, гранитогнейсы, входящие в состав конгломератов Ками-Асо. Они были

²² Конгломераты представляют собой осадочные породы, состоящие из крупных обломков и гальки, сцементированных известково-песчаным цементом. Гранитогнейсы — это горные породы, промежуточные между гранитами и гнейсами. — *Прим. ред.*

собраны в 1970 году экспедицией Мамору Адачи из Нагойского университета. После этого Кэн Сибата, используя рубидий-стронциевый метод, определил их возраст в 2 миллиарда лет.

Однако было бы опрометчиво делать из этой цифры вывод о том, что непосредственно под Японскими островами простирается массивный докембрийский фундамент (то есть древнейшее основание из кристаллических пород, на котором залегают более молодые породы.— *Прим. ред.*). Хотя после открытия конгломератов Ками-Асо геохронологические исследования вулканических и метаморфических пород Японских островов значительно продвинулись вперед, других пород с возрастом, превышающим 1 миллиард лет, обнаружить не удалось.

Можно, правда, было бы предположить, что в древности такой фундамент на Японских островах существовал, но затем вследствие многократно повторявшихся процессов метаморфизма совершенно разрушился, сохранившись в небольших масштабах лишь в районе Хиды. Однако в случае Японских островов дать такую интерпретацию принципиально невозможно: на этот счет достаточно определенное суждение дает изотопное отношение кристаллизации стронция, характерное для вулканических и метаморфических пород Японских островов.

Об изотопном составе стронция довольно подробно рассказывалось в главе IV. Если резюмировать все сказанное там, можно вывести, что отношение содержания стронция-87 и стронция-86 представляет собой нечто вроде родословной. Пусть даже порода в результате

процессов метаморфизма совершенно изменит свой облик, зачеркнуть свою «родословную» ей не удастся. Величина изотопного отношения стронция у пород, поднявшихся непосредственно из мантии, обычно составляет 0,705 или меньше. С другой стороны, если порода образуется при перекристаллизации древних пород, эта величина будет равняться 0,710 и выше.

Если рассмотреть полученные на сегодня результаты изучения пород Японских островов, главным образом вулканических и метаморфических, то в них не обнаружатся высокие значения изотопного отношения стронция, характерные для пород, образовавшихся при перекристаллизации древней коры. Это является основным аргументом против предположения о существовании древнего фундамента докембрийского возраста под Японскими островами.

В конгломератах Ками-Асо содержатся особого рода кремнистые песчаники, называемые ортокварцитами. Такие песчаники часто встречаются в докембрийских отложениях на севере Кореи и Китая. Возникает мысль, не указывают ли ортокварциты на то, что конгломераты Ками-Асо непосредственно соответствуют докембрийским породам Северной Азии? И не входят ли в состав Японских островов фрагменты Азиатского материка, «отколовшиеся» от него при «раскрытии» Японского моря?

Это предположение поддерживают результаты изучения обломков гранодиоритов, подобранные драгой с поверхности поднятия Ямато, расположенного между Японскими островами и Приморским краем, в самом

центре Японского моря. Возраст и изотопные отношения стронция у этих образцов пород оказались чрезвычайно близкими к соответствующим характеристикам для пород района Хиды.

Движения океанического дна

Начало образования земной коры можно отнести ко времени не позднее 3,8 миллиарда лет назад. Как уже говорилось, образование коры не было кратковременным процессом, а происходило непрерывно на протяжении почти всей истории Земли. Земная кора континентов, по-видимому, формировалась в ходе последовательно повторявшихся орогенических движений. При этом в центре образующегося континента располагался более древний массив, являвшийся «ядром» континента, а вокруг него в ходе орогенических движений постепенно нарастала новая кора.

Не правда ли, растущий таким образом континент довольно здорово смахивает на разрезанную луковицу? Однако по мере накопления данных по определению возраста пород эта «луковичная» теория оказалась несостоятельной, стало все более очевидным, что действительная структура коры гораздо сложнее.

Образующаяся в ходе повторяющихся орогенических движений земная кора имеет складчатое строение, аналогом которого является, например, привычное нашему взгляду чередование горных хребтов и ущелий. В рамках разработанной в последнее время новой теории, так называемой тектоники плит, не только дается единое, «унифицированное»

объяснение движений земной коры, но и связывается воедино геологическое развитие отдельных континентов, удаленных друг от друга на огромные расстояния и, на первый взгляд, не очень связанных между собой. Единого объяснения орогенических движений удалось достигнуть, положив в их основу движения океанического дна.

Например, разделение и последующий дрейф материков Южной Америки и Африки объясняются расширением («раскрытием») находящегося между ними Атлантического океана. Формирование такой величественной горной системы, как Гималаи, объясняется столкновением с Евразией Индостанского субконтинента, двигавшегося на север, после того как он отделился от Антарктиды и Мадагаскара, составлявших ранее с ним единый блок. В зоне столкновения произошло смятие горных пород в складки, как раз и приведшее к образованию Гималаев.

Таким образом, говоря об истории Земли, нельзя не упомянуть об океаническом дне. В его строении выделяют три главных типа структур. Это, во-первых, срединно-океаниче-

Рис. 13. Структура океанического дна



ские хребты, в пределах которых вещество мантии выходит на поверхность Земли. Устремляясь в разные стороны от срединно-океанического хребта, породы, появившиеся из мантии, образуют вторую структуру — собственно океаническое дно. И наконец, в глубоководных желобах (впадинах) океаническое дно вновь погружается в мантию. Все это изображено на рис. 13.

В качестве наиболее типичных примеров срединно-океанических хребтов можно указать на Срединно-Атлантический хребет, проходящий с севера на юг почти по центру Атлантического океана, и на тянущееся почти параллельно Тихоокеанскому побережью Южной Америки Восточно-Тихоокеанское поднятие. Последнее представляет собой величественный подводный горный хребет с круто уходящими ввысь склонами, высота которых над океаническим дном достигает нескольких километров, а длина превышает 10 000 километров. На суше подобных по масштабу горных сооружений нет.

Особенно много геофизических и геологических исследований, оказавших сильную поддержку теории, тектоники плит, согласно которой океаническое дно образуется за счет мантийного вещества, выходящего в срединно-океанических хребтах, было проведено в районе Срединно-Атлантического хребта. Среди них выделяется осуществлявшийся с 1971 по 1974 год в основном американскими и французскими учеными проект ФАМОУС²³ (аббревиатура полного названия, которое в перево-

²³ Видимо, не без умысла для названия проекта была выбрана аббревиатура, совпадающая с английским словом «знаменитый». — *Прим. ред.*

де с английского означает «Франко-американский проект подводных исследований срединно-океанических хребтов»). При этом использовались французские глубоководные исследовательские аппараты типа «Архимед» и аналогичные им по назначению американские корабли «Алвин».

В рамках этого проекта ученые, наряду с различными физическими исследованиями, смогли провести и непосредственное изучение срединно-океанических хребтов. Полученные результаты позволили установить действительный вид геологических движений коры при выходе мантийного вещества, открыть связанные с этим явлением геологические структуры и дать им истолкование. Наконец, они послужили конкретным подтверждением структуры срединно-океанических хребтов, предсказанной теорией расширения океанического дна.

Считается, что в Срединно-Атлантическом хребте, Восточно-Тихоокеанском поднятии и других активных в настоящее время срединно-океанических хребтах по-прежнему продолжается выход мантийного вещества. Следовательно, можно предположить, что породы этих океанических структур возникли совсем недавно и их возраст очень молод. Поднимающееся из мантии вещество, распространяясь в обе стороны от срединно-океанического хребта, образует океаническое дно. Это является центральным положением так называемой теории расширения (раскрытия) океанического дна.

Перемещающийся в разные стороны от срединно-океанического хребта блок литосферы (то есть внешней сферы «твердой» Земли,

включая земную кору и часть верхней мантии.— *Прим. ред.*) движется, подобно массивной плите. Слово «плита» и стало официально узаконенным термином для обозначения движущегося слоя литосферы. Это отразилось и в названии пользующейся сегодня огромной популярностью теории тектоники плит, которая объясняет геологические движения глобального характера как движения литосферных плит. «Новая глобальная тектоника» сейчас, начиная со второй половины 60-х годов, интенсивно развивается молодым французским ученым Ксавье ле Пишоном и рядом других исследователей.

Расширение океанического дна

Согласно сегодняшним представлениям, в центральной зоне срединно-океанических хребтов возраст горных пород должен быть самым молодым, а в горизонтальных направлениях от них должен постепенно увеличиваться. Палеонтологические исследования осадочных пород глубоководного океанического дна довольно хорошо подтверждают этот вывод. Если говорить о Тихом океане, то возраст пород почти равен нулю вблизи Восточно-Тихоокеанского поднятия, но по обе стороны от него постепенно увеличивается.

Можно предположить, что наиболее древние породы в Тихом океане должны располагаться у восточных склонов Японского, Идзу-Бонинского и Марианского глубоководных желобов (рис. 14), наиболее удаленных от Восточно-Тихоокеанского поднятия. По палеонтологическим данным, возраст пород этих районов изменяется от юрского (208—140 миллионов

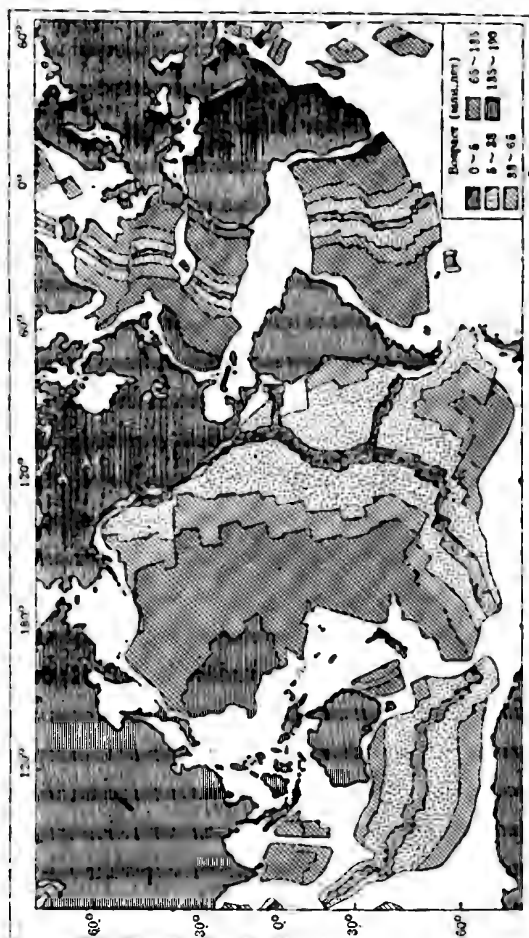
лет назад) до раннемелового (около 140 миллионов лет назад).

Включившись в 1975 году в международный проект глубоководного бурения ИПОД, японские ученые смогли принять участие в изучении пород глубоководного океанического дна и залегающих под ними пород более древнего фундамента. В ходе проекта ИПОД исследователям неоднократно удавалось углубиться в породы фундамента на несколько сотен метров. При этом постепенно накапливались данные по абсолютному возрасту фундамента. В результате, за некоторыми исключениями, почти полностью подтвердилась схема изменения возраста, полученная при изучении окаменелостей осадочных пород. Что же касается исключений, то не похоже, чтобы они опровергали основы теории расширения океанического дна.

Магма, выплавляющаяся из мантии и изливающаяся в срединно-океанических хребтах, имеет температуру свыше 1000°C . Удаляясь от срединно-океанических хребтов, вышедшее из мантии вещество на протяжении 1—10 миллионов лет остывает. Поскольку температура выше всего в верху срединно-океанического хребта, там достигает наибольшей величины тепловое расширение пород. Поэтому вблизи от срединно-океанических хребтов глубина океана небольшая. По мере удаления от этих районов, в связи с уменьшением объема пород при остывании, глубина должна постепенно расти. И действительно, в западной части Тихого океана, в направлении к Японским островам, глубина увеличивается.

Согласно тектонике плит, появляющееся в срединно-океанических хребтах океаническое

Рис. 14 Геохронология океанического дна



дно, раздвигаясь в обе стороны, в конце концов сталкивается с островными дугами и континентами и погружается под них. Часть океанического дна, начинающая это погружение, и называется глубоководным желобом. Погружающаяся в глубоководном желобе под континент литосферная плита вновь возвращается в мантию.

Наблюдаемые на континентах и островных дугах орогенические (горообразующие) движения, согласно тектонике плит, зависят от силы столкновения движущейся плиты и континентов или островных дуг. Когда плиты погружаются в глубоководном желобе в мантию, там происходит «сдирание», выдавливание и нагромождение осадочных и магматических пород, движущихся на верхней части плиты. Так объясняет теория образование значительной надводной части (остова) островных дуг, подобных Японским островам.

Действительно, при наблюдении геологических структур, которые в местах своего появления на поверхность совершенно перпендикулярны океаническому дну, не может не прийти мысль, что они являются океанической корой, сорванной с поверхности плит в глубоководных желобах. Когдадвигающаяся на запад плита сталкивается подобным образом с Японским архипелагом, энергия этого столкновения и является причиной землетрясений, возникающих вдоль Японского желоба.

Итак, тектоника плит действительно удивительно красиво и вместе с тем единообразно объясняет многие геологические явления: от происхождения геологических структур планетарного масштаба и орогенических движений до причин возникновения землетрясений.

Однако, с другой стороны, имеется ряд фактов, которым в рамках тектоники плит в обычном своем варианте не удастся дать удачного объяснения. Далее я приведу пример подобного случая из своего личного опыта.

Загадочные породы срединно-океанических хребтов

В 1947 году экспедицией на научно-исследовательском судне Геологического института Ламонта Колумбийского университета (США) во время рейса в Атлантике было поднято несколько образцов пород с поверхности Срединно-Атлантического хребта. По данным микроскопических исследований, это были несколько видоизмененные базальты. Тогда же Т. Калп, работавший в то время в Колумбийском университете, используя калий-аргоновый метод, определил возраст этих пород в 48 миллионов лет.

Однако эти породы были собраны в самом центре Срединно-Атлантического хребта, и с точки зрения тектоники плит их возраст должен был быть равным нулю. В 50-х годах институт Ламонта был одним из мест, где рождалась гипотеза о расширении океанического дна и вышедшая из нее тектоника плит. Идущий вразрез с предсказаниями теории возраст этих загадочных пород (которые в журнале регистрации образцов были обозначены как АМ50) стал считаться ошибкой эксперимента и, по-видимому, вскоре совершенно бы стерся из памяти ученых.

Было известно, что калий-аргоновый метод имеет тенденцию давать время от времени очень древний возраст, совершенно не связан-

ный с настоящим возрастом породы. Почти в то же самое время появилось сообщение, что для пород, найденных на Кольском полуострове, с помощью калий-аргонового метода был определен, как потом оказалось ошибочно, возраст 4—6 миллиардов лет. Хотя калий-аргоновый метод имеет широкий диапазон применимости, однако наряду с этим достоинством у него имеются и недостатки: сложность лабораторных операций, связанных с применением этого метода, и трудность проверки, действительно ли полученное значение отражает истинный возраст породы.

Появление рубидий-стронциевого метода было для изотопных геохронологических методов как бы открытием нового измерения. Это было связано с появлением такого тонкого средства, как метод изохрон. Данный метод основывается на следующем. Исследуемый образец делится на несколько проб: если все они покажут одинаковый возраст, то можно с уверенностью принять его за возраст породы. (Для того чтобы получить несколько проб, обычно берут либо различные минералы одного и того же образца, либо разделяют сам образец на несколько частей.) Поскольку эти пробы, конечно же, образовались в одно и то же время, то при корректности метода должны получаться одинаковые возрасты для каждой пробы.

Этот принцип кажется довольно очевидным, однако в случае рубидий-стронциевого метода его использовать невозможно. При определении возраста пород измеряют в них отношение количества подвергающихся распаду родительских элементов к количеству образующихся из них дочерних элементов. В слу-

чае калий-аргонового метода можно считать, что весь содержащийся в породе аргон-40 образовался при распаде родительского элемента калия-40. Однако в случае рубидий-стронциевого метода мы уже не имеем права считать, что весь содержащийся в породе стронций-87 образовался при распаде рубидия-87.

Дело в том, что в магме уже содержалось некоторое количество стронция-87 (конечно, аргон-40 тоже содержится в магме, но, являясь газом, он полностью выделяется из магмы при ее изливании на поверхность Земли). Для применения рубидий-стронциевого метода необходимо прежде всего каким-либо способом установить, какая часть стронция-87 исследуемой породы образовалась из рубидия-87.

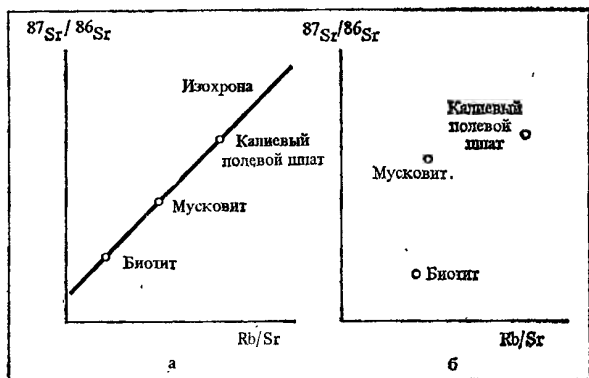
Для решения этой задачи и применяют метод изохрон. При этом для проб, на которые разделен образец, наряду с отношением количеств стронция-87 и рубидия-87, измеряется отношение количеств изотопов стронций-87 и стронций-86. Затем строится график, на горизонтальной оси которого откладывается первое из этих отношений, а на вертикальной — второе (рис. 15). Прямая линия, соединяющая полученные точки, и называется изохроной. Если использовать законы радиоактивного распада, можно показать, что наклон этой прямой указывает на возраст пород, но мы здесь не будем углубляться в этот вопрос.

Когда исследуется порода, подвергавшаяся выветриванию, можно предположить, что влияние выветривания для различных проб должно быть различным. Поэтому должен наблюдаться разброс значений возраста проб.

Точки, соответствующие разным пробам, перестанут ложиться на прямую линию, и определить возраст породы станет невозможно. Если обратиться к рис. 15, то в случае *а* мы можем получить достоверное значение возраста, а в случае *б*, из-за того что образец подвергался выветриванию, точки, соответствующие пробам, не ложатся на прямую линию и возраст определить невозможно. (В представленном случае в качестве проб использовались разные минералы, входящие в состав породы: калиевый полевой шпат, мусковит и биотит.)

Таким образом, если использовать метод изохрон, гарантируется довольно высокая надежность результата. С тем, что это достоинство, легко согласится каждый, кто имел дело с калий-аргоновым методом. Но в этом методе есть тот большой недостаток, что значение возраста в нем однозначно определяется отношением количеств калия-40 и аргона-40,

Рис. 15. Схема метода изохроны для изотопного отношения стронция ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)



но при измерении содержания этих элементов могут быть допущены ошибки, к которым приводят калий и аргон, не входившие в состав породы.

Но метод изохрон, хотя он и имеет очень высокую надежность, к сожалению, не пригоден для таких пород, как базальты, содержащие мало рубидия. Следовательно, использовать этот метод для определения возраста загадочных пород, собранных в Срединно-Атлантическом хребте, нельзя.

К счастью, во второй половине 60-х годов на сцене появился очень мощный аргон-аргоновый метод. Он является объединением калий-аргонового метода и метода изохрон. Он был разработан профессором Калифорнийского университета Рейнольдсом и его учениками К. Меррихью и Дж. Тернером. Данный метод вполне применим к базальтам, и поэтому можно было быть уверенным в достоверности результатов, которые, казалось бы, вступают в противоречие со здравым смыслом.

Случайно получив от профессора А. Мияси́ро, преподающего геологию в Нью-Йоркском университете, загадочные океанические породы из института Ламонта, я немедленно попытался определить их возраст аргон-аргоновым методом. Результат оказался ошеломляющим. Возраст этих пород был равен 170 миллионам лет. Данные очень точно ложились на прямую линию, образующую изохрону. Проверив еще раз все свои действия во время опыта и анализа данных, я не нашел ничего вызывающего хоть малейшее сомнение. Собранный с духом, я решил опубликовать эти удивительные данные, послав статью в один западноевропейский научный журнал.

Когда статья была напечатана, один видный французский геолог прокомментировал ее следующим образом: «...Хотя описываемый в статье эксперимент не вызывает никаких сомнений, однако нет совершенно никаких гарантий, что этот образец был действительно отобран на поверхности Срединно-Атлантического хребта. В свое время мне (рецензенту) довелось побывать в институте Ламонта. Порядок хранения образцов там был довольно удручающим и падение образцов с одной полки на другую и тому подобные беспорядки были обычным явлением».

Поскольку этот ученый был одним из основателей тектоники плит, его мнение было очень авторитетным.

Сомнения (правда, несколько иного рода), основанные на личном опыте, приобретенном при сборе образцов в северной части Тихого океана, высказал в довольно откровенной форме и один мой друг, ученый из Великобритании. Действительно, иногда бывает, что в высокоширотных районах, близких к полюсу, поднимают со дна моря породы явно континентального происхождения. Двигающиеся по суше ледники часто «срезают» породы поверхностного слоя, а достигая берега моря, они образуют айсберги, в которые входят и эти захваченные материковые породы. Когда айсберги в конце концов тают, эти породы опускаются на дно.

Однако доктор. Фумико Сиде из Нью-Йоркского университета, проводивший минералогическое исследование образцов, для которых мною был определен возраст, отверг предположение, что эти загадочные породы могут иметь континентальное происхождение.

Согласно данным Сиды, эти несколько метаморфические породы имеют очень типичную, характерную именно для океанических базальтов структуру. Кроме того, результаты их химического анализа также совершенно четко обнаруживают особенности, свойственные океаническим базальтам. Наконец, породы были собраны на сравнительно низких широтах, где их не могли достичь айсберги. И вообще, из окружающих их местоположение районов моря никогда не поднимали пород континентального происхождения.

Учитывая все это, следует, по-видимому, признать, что эти породы имеют океаническое происхождение.

Хотя определенный с помощью аргон-аргонового метода возраст этих пород на первый взгляд является довольно странным с точки зрения тектоники плит, однако если поразмыслить, в этом, может, есть какой-то смысл. Приводимые данные по расширению океанического дна и дрейфу континентов указывают на то, что Америка и Африка стали разделяться и между ними начал образовываться Атлантический океан примерно в середине юрского периода (140—208 миллионов лет назад). А это совпадает с возрастом наших загадочных пород.

Сопоставляя этот возраст и изотопное отношение стронция с результатами исследований минерального состава этих пород, я предположил, что они являются вулканическими и поднялись по разломам, образовавшимся непосредственно перед началом раскрытия Атлантического океана. Эти изверженные породы, образовавшиеся почти одновременно с началом расширения Атлантиче-

ского океана, оказались потом погребенными под поверхностью Срединно-Атлантического хребта. Впоследствии в результате некоторых перемещений вдоль разрывных нарушений в породах они оказались на поверхности океанического дна, откуда были подняты экспедицией института Ламонта.

Действительно, поблизости от срединно-океанических хребтов существуют зоны разломов, и загадочные породы были отобраны в одной из них. Если мое предположение об этих породах верно, то в теорию раскрытия океанического дна нужно внести некоторые более или менее локальные поправки. Крупные изменения в тектонике плит, конечно, не обязательны. Недавно, проводя исследования зон разломов в районе Срединно-Атлантического хребта, Е. Бонатти и другие ученые из Колумбийского университета обнаружили там древние мелководные осадочные породы. Бонатти пришел к заключению, что эти породы относятся к эпохе существования мелководного моря в этом районе еще до начала раскрытия Атлантического океана.

Но тогда возникает вопрос: может быть, при образовании новой океанической коры и ее растекании по обе стороны от срединно-океанического хребта часть древних пород, существовавших ранее на этом месте, так и осталась над «отверстием», из которого поднимается мантийное вещество?

Открытие древней суши Оясио

Приведем еще один пример, трудно-объяснимый в рамках тектоники плит. Начиная с 1975 года согласно проекту ИПОД по

всему Мировому океану проводится отбор пород основания (фундамента) океанического дна. Уже получено много интересных результатов, один из которых касается Японских островов,— это открытие древней суши Оясио (по названию, которое дали Курильскому течению японцы.— *Прим. пер.*). Обнаруженная осенью 1977 года, во время исследовательского рейса научно-исследовательского судна в рамках этого проекта ИПОД, она была названа так доктором Н. Насу, возглавлявшим научные работы на судне.

Оясио представляет собой довольно крупный массив, расположенный не далее 100 километров от Японского желоба (рис. 16).

Изучение его осадочных пород показало, что в меловом периоде этот массив был, по видимому, древней сушей, возвышавшейся над уровнем моря. Впоследствии он начал погружаться и 20—30 миллионов лет назад окончательно скрылся под поверхностью моря.

Согласно тектонике плит, континентальная сторона глубоководного желоба должна быть приподнятой, «задираясь» под давлением прижимающейся к ней вплотную океанической плиты. Поэтому случай с погружением массива суши, расположенного с континентальной стороны желоба, объяснить довольно трудно в рамках тектоники плит.

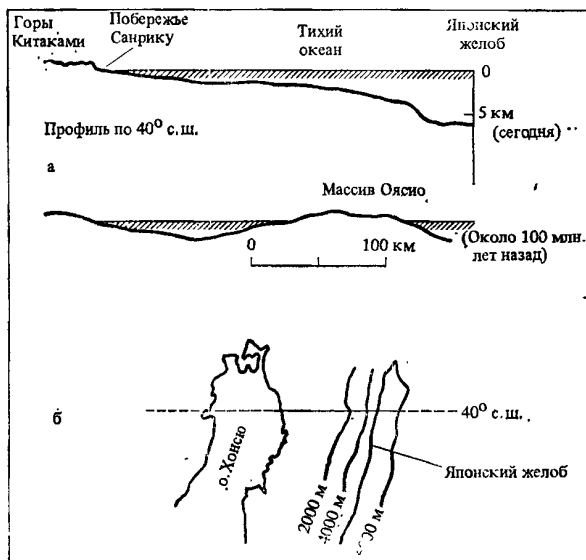
Еще одним неожиданным фактом было то, что совсем неподалеку от глубоководного желоба обнаружили следы очень молодой (около 22 миллионов лет назад) вулканической деятельности.

Плита, погружающаяся в Японский желоб, проходит под Японскими островами. В ре-

зультате возникновения трения между погружающейся плитой и окружающим ее мантийным веществом должно выделяться тепло, которое приводит к образованию магмы. Эта магма, поднимаясь, достигает Японских островов и образует наблюдаемые там вулканы (такое объяснение давала тектоника плит вулканической деятельности, проявляющейся в пределах островных дуг).

Для того чтобы наклонно погружающаяся в сторону континента плита достигла глубины (как полагают, около 100 километров),

Рис. 16. Древняя суша Оясио: *а* — современный и позднемеловой профиль суши по линии 40° с. ш.; *б* — район расположения древнего массива суши Оясио



необходимой для превращения пород в магму, она должна пройти от глубоководного желоба в сторону континента расстояние в горизонтальном направлении в несколько сот километров. Это как раз соответствует тому месту, где расположены Японские острова. В то же время, поскольку трудно предположить, что на расстоянии всего 100 километров от желоба плита уже погрузилась на глубину, достаточную для образования магмы, то никто, конечно, не мог ожидать здесь какой-либо вулканической деятельности.

Неподалеку от древней суши Оясио пробуренная на океаническом дне скважина вскрыла слой андезитовых конгломератов (то есть конгломератов, галька и обломки которых состоят из андезита.— *Прим. ред.*). Источник, из которого поступили эти обломочные породы, достигающие мощности (толщины слоя, пласта) 40 метров, несомненно располагался где-то неподалеку, и, может быть, им была сама древняя суша Оясио. Возраст этих конгломератов, измеренный аргон-аргоновым методом, оказался равным 22 миллионам лет.

Гораздо древнее фундамент, сложенный вулканическими породами мелового возраста, у Тохоку — прибрежного района северо-восточной части Японии, расположенного напротив Оясио.

С другой стороны, возраст вулканических пород Оясио очень хорошо совпадает с периодом бурной вулканической деятельности, проявлявшейся в центральной части Северо-Восточной Японии 17—22 миллиона лет назад (так называемая эпоха «зеленых туфов»).

Тектоника плит и эволюция мантии

Увлечение тектоникой плит достигло такого уровня, который приводит к ощущению, что она в 70-х годах почти монопольно захватила всю тематику работ в области наук о Земле. Однако немалое число исследователей начинают постепенно отходить от нее. Основываясь на своем опыте, я могу сказать, что многие факты остаются труднообъяснимыми, если тектонику плит применять механически. С другой стороны, отвергать всю эту теорию полностью, основываясь только на некоторых разрозненных фактах, было бы неверно.

В настоящее время, помимо тектоники плит, нет теории, которая бы одновременно и единообразно объясняла и чрезвычайно закономерный вид магнитных аномалий океанического дна (факт, из которого родилась теория раскрытия океанического дна), и углубление океана по направлению от срединно-океанических хребтов к глубоководным желобам, и симметричное увеличение возраста океанического дна в разные стороны от срединно-океанических хребтов. Как бы ловко ни объяснялось каждое явление в отдельности критиками тектоники плит с привлечением многочисленных гипотез, все они имеют малый вес, пока не будет создана другая теория, дающая единое объяснение многим фундаментальным фактам. В то же время вряд ли нужно напоминать, что многие законы могут считаться законами только в определенных рамках их применимости.

Под литосферной плитой, движение кото-

рой является основным положением тектоники плит и теории расширения океанического дна, понимается геологическая структура с горизонтальными размерами несколько десятков тысяч километров и толщиной до 100 километров. Движением и взаимодействием подобных плит обычно объясняются геологические явления, имеющие такие же масштабы. В этом и состоит немалая доля привлекательности тектоники плит — в том, что размер плит соответствует масштабам объясняемых явлений. Вспомним, что изучение строения атома стало возможным, только когда стали применять средство, соответствующее по размерам объекту исследования.

При применении же тектоники плит к явлениям очень небольшого масштаба иногда возникают затруднения. Но из того, что тектоника плит не может объяснить явления весьма малого масштаба по сравнению с размерами движущейся плиты, делать вывод о полной непригодности этой теории было бы неверно.

В то же время тектоника плит с самого своего возникновения развивалась на базе преимущественно геофизических данных, главным образом сейсмических. И следует обратить внимание на то, что объекты ее наблюдений (земной магнетизм, сейсмические волны, порождаемые землетрясениями, тепловой поток) относятся к физическим явлениям. В то же время в этой теории почти не использовались геохронологические методы при изучении движения вещества земных недр, что, как подчеркивалось неоднократно в этой книге, является «становым хребтом» развития Земли.

Как мы знаем, из изучения распределения радиоактивных изотопов можно сделать выводы о движении вещества в недрах планеты, об обмене материалом между обособившимися друг от друга мантией и корой. В противоположность геофизическим эти методы могут быть названы геохимическими. И как было показано, при изучении взаимодействия коры и мантии на протяжении столь длительного времени, как вся история Земли, можно ограничиться рассмотрением лишь обычного перемещения (миграций) мантийного вещества к коре.

В связи с этим интересно рассмотреть взаимодействие между мантией и корой с позиции тектоники плит. Согласно этой теории, мантийное вещество, появляясь на поверхности в срединно-океанических хребтах, начинает двигаться в разные стороны от них. Скорость этого движения, как полагают, порядка 1—10 сантиметров в год. Таким образом, через 100—200 миллионов лет возникшая в срединно-океаническом хребте плита должна достичь глубоководного желоба и вновь погрузиться в мантию. Таким образом, с точки зрения тектоники плит процесс взаимодействия мантии и коры соответствует полной циркуляции вещества с циклом, не превышающим несколько сот миллионов лет.

На первый взгляд получается противоречие с геохимическим подходом, рассматривающим одностороннее движение вещества из мантии в кору. Как же разрешить это противоречие?

Пока это никому не удается. Однако мне представляется, что это расхождение лишь кажется на первый взгляд противоречием, оно

связано с рассмотрением событий разного временного масштаба, которое проводится при геохимическом и геофизическом подходах. Установленное геофизическими методами движение плит охватывает промежуток времени самое большое в несколько сот миллионов лет. При использовании геохимических методов, основанных на изучении изотопов с периодами полураспада, превышающими миллиарды лет, исследуется поведение объектов за промежутки времени, сравнимые с возрастом Земли.

Если рассматривать отрезки времени в несколько миллиардов лет и больше, то процесс взаимодействия мантии с корой действительно выглядит как однонаправленное перемещение мантийного вещества, но если ограничиться короткими отрезками в несколько сот миллионов лет, он вполне может быть представленным в виде циркуляции. По сегодняшним представлениям, движение плит ограничено промежутком, уходящим в прошлое до нескольких сот миллионов лет.

Возраст современного океанического дна не превышает 200 миллионов лет. Следов существования и движения литосферных плит в более древние эпохи не обнаружено. Вопрос о том, возникало ли еще когда-нибудь в прошлом движение плит, подобное осуществляющемуся в течение последних 200 миллионов лет, наиболее горячо обсуждается в последнее время.

Дрейф континентов

На рис. 17 справа помещен фрагмент современной карты мира, включающий

материки Африку и Южную Америку. На левой стороне показан рисунок, где контуры этих континентов совмещены. Хорошо видно, как точно Бразильский полуостров вкладывается в побережье Берега Слоновой Кости. Да и в целом очертания двух континентов поразительно совпадают. Не так ли?

Этот рисунок взят из изданной в 1885 году в Париже книги Антона Снайдера «Сотворение мира — приподнимем покрывало мистики». Может ли такое поразительное совпадение быть простой случайностью? Или подобно некоему «природному провидению» оно имеет какой-то более глубокий смысл?

Снайдер, изобразив этот рисунок, имел в виду как раз такое «провидение». Обнаружив появление похожей ископаемой фауны в обычных каменноугольных слоях и в Африке и Южной Америке, он задал вопрос, не составляли ли эти континенты в тот период одно целое? На рис. 17 отражен его собственный ответ на этот вопрос. Если допустить, что в каменноугольном периоде оба континента соединялись, появление одинаковых видов в пластах той эпохи становится вполне естественным.

Но если говорить о движении континентов, нельзя сказать, что мысль об этом впервые была высказана Снайдером. На самом же деле ее можно встретить уже у Роджера Бэкона и еще у очень многих авторов. Однако, связав одновременное появление одинаковой фауны на обоих материках с их движением, Снайдер перевернул новую страницу в развитии наших представлений о дрейфе континентов.

Но все же, будучи слишком смелой гипоте-

зой, идея о дрейфе континентов в то время не получила общего признания. Однако в 1912 году А. Вегенер вновь вывел ее на сцену.

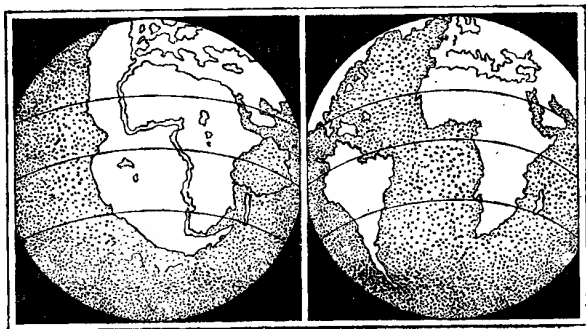
Вся жизнь этого ученого, полная всяких превратностей и трагически завершившаяся в 50 лет (когда он в 1930 году пропал во льдах Гренландии), была посвящена тому, чтобы привлечь к гипотезе дрейфа континентов внимание всего мира.

Однако потребовалось еще 20 лет, чтобы в 50-е годы многие ученые действительно пришли к выводу, что на Земле в самом деле происходило движение материков. Значительную роль в этом сыграли данные, полученные с помощью палеомагнитологии.

Палеомагнетизм и дрейф континентов

Как мы знаем, наша планета обладает магнитным полем, близким к полю, создаваемому огромным стержневым магнитом,

Рис 17. Рисунок из книги А. Снайдера «Сотворение мира — приподнимем покрывало мистики»



расположенным в ее центре. Точки, где этот гигантский магнит пересекал бы земную поверхность, называются северным и южным магнитными полюсами. Географические и магнитные полюса Земли несколько различаются в своем положении; в настоящее время эта разница в положении составляет около 12° . Направление на магнитный полюс для заданной точки земной поверхности непрерывно меняется с течением времени. Если проследить вызывающее это явление перемещение полюсов по поверхности Земли для разных периодов ее истории, получится некоторая кривая, которую называют линией дрейфа магнитных полюсов.

Подобно тому как обычный магнит имеет два отдельных полюса, магнитные полюса Земли, дрейфуя с течением времени, тоже будут описывать на поверхности Земли две различные кривые (разумеется, воображаемые) отдельно для Северного и Южного полушарий.

Вскоре же после второй мировой войны, в начале 50-х годов, началось активное развитие исследований в СССР, Франции, Великобритании, США и Японии по изучению намагниченности пород Земли. Тогда создалась такая ситуация, что Великобритания и Япония оказались выше других в этих исследованиях. При этом, в то время как японские исследователи наибольший интерес питали к физическому механизму намагничивания пород, внимание английских ученых, возглавляемых профессором Блэккеттом (получившим Нобелевскую премию за исследования космических лучей), было обращено на геологические аспекты этой проблемы.

То, что привыкшие к высоким абстракциям, склонные к академическому складу мышления блестящие физики-экспериментаторы с азартом включились в исследования довольно прозаических булыжников, какими обычно выглядят породы, и принялись рьяно изучать, казалось бы, далекие от них геологические проблемы, является проявлением известного за англичанами духа «любительства», традиционно являющегося сильной стороной ученых этой страны. Но именно благодаря работам английских ученых палеомагнитология добилась блестящих успехов, дав свидетельство дрейфу континентов и сделав решительный шаг в обосновании теории расширения океанического дна.

В 50-х годах ученые Лондонского и Кембриджского университетов, используя собранные по всему миру образцы, изучали намагниченность пород. Поскольку при своем формировании породы намагничиваются в направлении существовавшего тогда земного магнитного поля, то, изучая намагниченность пород, можно получить информацию о магнитном поле Земли соответствующей эпохи. В частности, можно установить положение магнитного полюса во время образования пород, а взяв породы различного возраста, определить, где находились магнитные полюса в соответствующие эпохи. Если соединить полученные точки, получится линия дрейфа магнитных полюсов.

Разделение Америки и Африки

На рис. 18, *а* и *б* показаны линии дрейфа магнитных полюсов, установленные

С. Ранкорном, работавшим в то время в Кембриджском университете и изучавшим породы, собранные в Африке и Южной Америке. Около линий дрейфа показаны значения возраста и видно, что с увеличением возраста разница с современным положением этих полюсов становится все более заметной. Причем линия дрейфа магнитных полюсов, установленная по породам, собранным в Африке, и соответствующая ей линия для пород Южной Америки отличаются друг от друга.

Каким же образом могло возникнуть такое расхождение?

Ранкорн заключил, что это расхождение образовалось вследствие относительного смещения Африки и Южной Америки. Действительно, если передвинуть континенты так, чтобы линии дрейфа совпали, то получится ситуация, показанная на рис. 18, в. Таким образом, при размещении континентов так, чтобы Бразильский выступ точно «вкладывался» в район Берега Слоновой Кости, две линии дрейфа магнитных полюсов совпадают. Если этот рисунок сравнить со схемой дрейфа континентов, предложенной Снайдером, станет ясно, что они поразительно похожи.

Посмотрим на рис. 18 более внимательно. Очевидно, что совпадение двух линий дрейфа магнитных полюсов имеет место для точки, соответствующей возрасту 200 миллионов лет (после этого они вновь несколько расходятся). Этот факт станет полностью объяснимым, если принять гипотезу об относительном смещении континентов.

Около 200 миллионов лет назад, об этом свидетельствует рис. 18, в, Африканский и Южноамериканский континенты составляли

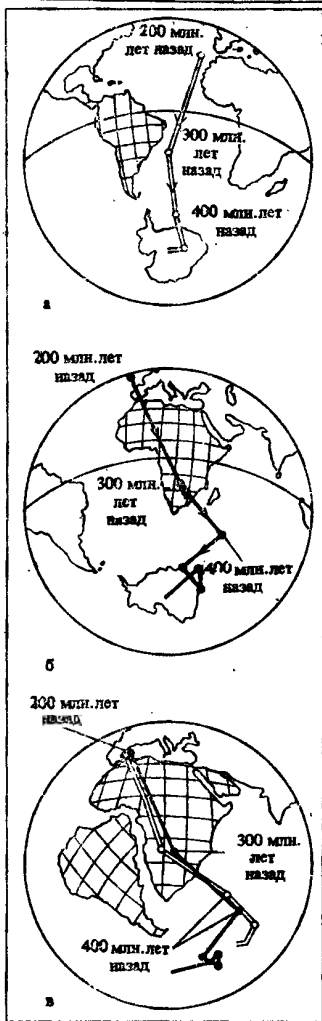


Рис. 18. Дрейф магнитных полюсов и дрейф континентов

одно целое. Если допустить это, то дрейф магнитных полюсов в эпоху, предшествующую этому времени, изобразится одной линией. А если перевести континенты в нынешнее разъединенное состояние, то линии дрейфа магнитных полюсов, определенные по образцам пород этих континентов, тоже разойдутся. Возраст, с которого начинается разделение линий дрейфа магнитных полюсов, будет соответствовать времени разделения континентов. Как видно из рис. 18, это было примерно 200 миллионов лет назад.

Дрейф континентов, установленный по данным о намагниченности пород, имеет почти тот же вид, который предсказывали Снайдер, Вегенер и другие по результатам геологических наблюдений. Кроме того, близкие выводы о дрейфе континентов дает развивающаяся с 60-х годов теория расширения океанического дна.

Однако исследования намагниченности горных пород и теория расширения океанического дна замечательно объясняют движение континентов за промежуток времени вплоть до 200 миллионов лет назад²⁴. А происходило ли такое движение в более древние эпохи? По этому поводу мы не можем сказать почти ничего определенного.

²⁴ Несмотря на столь убедительные свидетельства, гипотеза дрейфа континентов и в настоящее время остается все лишь гипотезой, имеющей много сторонников, но также много и противников. Что же касается палеомагнитных данных, якобы доказывающих дрейф континентов, то они не вызывают уж столь большого доверия, если учитывать, помимо дрейфа магнитных полюсов, еще и существующий дрейф географических полюсов, перемещение оси вращения Земли в пространстве и в самой Земле и многое другое.—
Прим. ред.

ГЛАВА VII ПРОИСХОЖДЕНИЕ АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Когда возникла атмосфера?

Только благодаря существованию воздуха стало возможным появление на Земле всего живого, в том числе и человека. Однако воздух настолько не бросается в глаза, что мы склонны забывать, что он не распространен в космосе повсеместно. В то же время космонавты, выходя в открытый космос и ступая на поверхность Луны, облачались в скафандры, и это совершенно недвусмысленно указывало нам на то, что существование воздуха является специфическим свойством, характерным только для Земли.

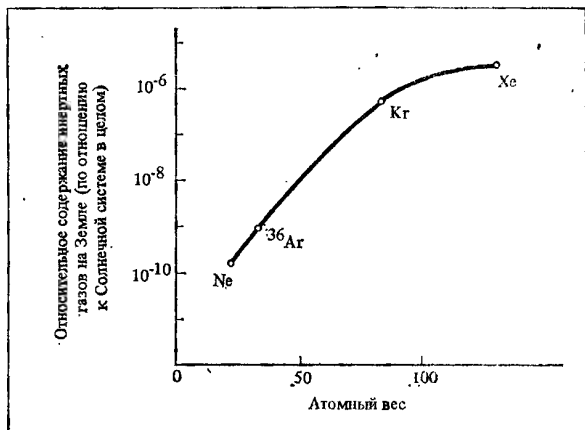
Земля не возникла в заполненном воздухом пространстве, воздух образовался уже после того, как завершилось формирование нашей планеты. И это положение должно быть отправным пунктом при изучении происхождения атмосферы, что впервые было обосновано профессором Калифорнийского университета Гаррисоном Брауном. На рис. 19 воспроизведен рисунок из статьи Брауна, опубликованной в 1947 году и ставшей как бы классической в теории происхождения атмосферы.

Рассматривая проблему возникновения земной атмосферы, Браун обратил внимание на количество инертных газов, входящих в ее состав. К ним относятся (в порядке увеличения атомного веса) гелий, неон, аргон, криптон, ксенон и радон. Последний относится к короткоживущим радиоактивным элементам, и в дальнейшем мы не будем его учитывать, говоря об инертных газах. Не имея химическо-

го сродства с другими элементами, они почти никогда не вступают с ними в реакции, являясь крайне неактивными элементами (отсюда и их название). Инертные газы содержатся в атмосфере в очень небольшом количестве, за исключением изотопа аргон-40, но об этом будет подробнее сказано позже. Объемное содержание, например, ксенона не превышает 0,001%, а неона, самого распространенного из инертных газов, — 0,002%.

Это вызвано отнюдь не тем, что эти элементы мало распространены в Солнечной системе (по сравнению, например, с другими элементами, имеющими близкое массовое число). Посмотрим вновь на рис. 19. На горизонтальной оси здесь отложен атомный номер инертного газа, на вертикальной — распространенность этого элемента на Земле (эти величины рассчитаны относительно кремния; см. рис. 5).

Рис. 19. Содержание инертных газов в земной атмосфере



Если теперь предположить, что при своем возникновении Земля захватила в качестве атмосферы часть газа протосолнечной туманности, то состав образовавшейся таким образом атмосферы будет в основном (за небольшими различиями) соответствовать составу протосолнечной туманности, послужившей источником атмосферы. При этом и для инертных газов тоже нельзя ожидать большой разницы с содержанием их в Солнечной системе в целом.

На Земле, однако, инертные газы являются чрезвычайно редкими; их содержание по сравнению с содержанием в Солнечной системе совершенно ничтожно. Отношение содержаний легкого инертного газа неона на Земле и в Солнечной системе в целом составляет около одной десятимиллиардной, а для тяжелого инертного газа ксенона — не более одной миллионной. Это указывает на то, что атмосфера Земли не связана непосредственно с газом протосолнечной туманности²⁵.

Рассуждая подобным образом, Браун при-

²⁵ Этот вывод не совсем корректен, если следовать рассуждениям автора. Прежде всего содержание инертных газов в Земле в целом здесь ни при чем. Иначе пришлось бы искать причину недостатка (по сравнению с содержанием в Солнечной системе) инертных газов не только в атмосфере, но и в самой Земле. С другой стороны, недостаток инертных газов в атмосфере Земли действительно где-то противоречит приведенным рассуждениям. Но, может быть, все заключается в химической неактивности инертных газов, не образующих тяжелые соединения и поэтому быстро улетучивающихся из земной атмосферы. Во всяком случае, несмотря на то что идея о вторичности происхождения земной атмосферы имеет очень много сторонников, она все же остается пока лишь гипотезой.—
Прим. ред.

шел к заключению, что атмосфера Земли не могла быть захвачена из протосолнечной туманности, а образовалась после формирования Земли как одна из ее характерных особенностей.

Было выдвинуто несколько гипотез, чтобы объяснить результаты, представленные на рис. 19. Но прежде чем к ним обратиться, сразу же ответим на возможный вопрос относительно того, почему на этом рисунке нет гелия. Дело в том, что, будучи очень легким, гелий беспрепятственно ускользает за пределы земной атмосферы, преодолевая силу притяжения Земли, и поэтому рассмотрение его содержания вряд ли представляет смысл.

А как вообще оценить общее количество инертных газов на Земле?

Анализируя вещество, из которого построены внутренние слои Земли, например вещество ксенолитов, входящих в состав вулканических пород и имеющих мантийное происхождение, можно определить количество содержащихся там инертных газов. Предполагая далее, что полученное таким образом значение близко к среднему значению для всех недр Земли, определяют количество инертных газов, заключенных в недрах нашей планеты. Если теперь к этой величине прибавить содержание инертных газов в атмосфере (а оно определяется точно), то при этом оценивается количество инертных газов на Земле в целом.

Выделение газов из недр Земли

Исследования Гаррисона Брауна указали на то, что земная атмосфера в современном ее виде, по-видимому, свойственна

только Земле и образовалась уже после того, как завершилось образование планеты. Но что же тогда послужило источником газовых составляющих современной атмосферы, когда и каким образом она сформировалась? ²⁶

Предположение, сделанное вскоре немецким физиком Вейцзеккером, дало ключ к решению этой проблемы. Для того чтобы понять ход рассуждений Вейцзеккера, давайте вновь обратимся к рис. 19. На нем для инертных газов подразумевалась сумма всех их существующих изотопов, но за одним исключением — для аргона учтен только изотоп аргон-36. Аргон же имеет три изотопа с массовыми числами 36, 38 и 40, причем природный аргон на 99,6% состоит из аргона-40. По своей распространенности в атмосфере Земли аргон занимает третье место после азота и кислорода; на него приходится около 1% всей массы атмосферы.

Вейцзеккер, обратив внимание на необычно высокое содержание аргона в земной атмосфере, предположил, что, вероятно, это вызвано образованием аргона при радиоактивном распаде калия, имеющегося в недрах Земли. Калий действительно содержится в некотором количестве в земных недрах. Один из его изотопов — калий-40 — при распаде превращается в аргон-40 (этот тип радиоактивного распада связан с еще не рассматривавшимся нами процессом электронного захвата), который затем, как рассуждал Вейцзеккер, должен выделяться из земных недр, образуя одну из составляющих атмосферы Земли.

²⁶ Заметим, что этот вопрос имеет принципиальное значение независимо от первичности или вторичности происхождения атмосферы Земли.— *Прим. ред.*

Предположение Вейцеккера о том, что необычно высокое содержание аргона-40 в земной атмосфере вызвано распадом калия-40, привело, как следствие, к идее о выделении газов из недр Земли. На основании этой идеи на рис. 19 было указано только содержание аргона-36, так как аргон-40, составляющий большую часть атмосферного аргона, не может в отличие от других инертных газов рассматриваться как существующий с самого момента возникновения Земли, поскольку имеет компонент, образующийся при радиоактивном распаде в земных недрах.

Возникновение других составляющих современной атмосферы Земли можно также объяснить результатом выделения газов из земных недр. Таким образом, вопрос о происхождении атмосферы можно свести к вопросу о выделении газов из земных недр. В связи с этим интересно рассмотреть, когда (или, лучше сказать, после чего) началось глобальное выделение газов из недр Земли?

Непрерывное образование атмосферы

Первым, кто попытался четко представить себе, как происходит выделение газов из земных недр, был американский ученый У. Руби. Сначала он в качестве наиболее очевидного источника рассмотрел процесс выделения газов в атмосферу при выветривании горных пород. Эти породы имеют в своем составе летучие компоненты (например, азот и воду), которые могут со временем стать частью атмосферы. Ведь, подвергаясь выветриванию, горные породы постепенно разрушают-

ся, и некоторая часть их летучих компонентов выделяется в атмосферу Земли. Руби как раз и решил оценить долю такой составляющей атмосферы.

Согласно его оценке, все летучие компоненты горных пород (то есть без учета осадочных пород), выделившиеся при выветривании, не составят и 1% общего количества газа, содержащегося в современной атмосфере, гидросфере и осадочных породах (в качестве летучих компонентов). Отложение же таких осадочных пород, как, например, карбонаты, и вовсе не могло происходить в отсутствие атмосферы и гидросферы. Следовательно, летучие компоненты в подобных осадочных породах необходимо рассматривать как часть древней атмосферы и гидросферы, перешедшую в вещество осадочных пород.

На основании своей оценки Руби заключил, что остальные 99% вещества атмосферы и гидросферы выделились непосредственно из мантии. Кроме того, он предложил и конкретные механизмы выделения газов из мантии: выделение газов из вулканов и с водами термальных источников. Руби оценил количество газов, выброшенных вулканами (в том числе и вулканами океанического дна) и выделившихся с водами термальных источников. Оказалось, что если на протяжении последних 3 миллиардов лет²⁷ выделение газов было таким же, как сегодня, то их количество в 100 раз превысило бы количество газов, содержащихся в современных атмосфере и гидросфере.

В действительности же, конечно, наблюдаемые вулканические газы (почти целиком

²⁷ Именно таким считался возраст Земли в 1951 году, когда была опубликована статья Руби.— *Прим. ред.*

представляющие собой водяной пар) и воды термальных источников — это не что иное, как бывшие поверхностные воды Земли, просочившиеся в ее недра. Но если предположить, что только 1% из них непосредственно поднялся из мантии, то количества газов, поступивших из внутренних недр Земли за 3 миллиарда лет, окажется достаточным, чтобы сформировать современную атмосферу и гидросферу. На основании этого Руби сделал вывод, что атмосфера и гидросфера образовались за счет газов из земных недр.

Идея Руби о так называемом непрерывном выделении газов упоминается во многих учебниках и до сих пор еще является наиболее широко распространенной гипотезой о процессе формирования атмосферы. Однако в свете последних данных оценки Руби вызывают некоторое сомнение. Как уже говорилось, ряд самых древних пород на Земле является метаморфическим, образовавшимся из осадочных пород. Следовательно, во время осаждения этих пород 3,7 миллиарда лет назад должны были уже существовать моря.

Кроме того, докембрийские породы, особенно осадочные, если присмотреться к их химическому составу, не обнаруживают никакой разницы с гораздо более молодыми породами. А это указывает на то, что характер морей, существовавших в докембрии, в наши дни почти не изменился. В последнее время ряд ученых (например, Р. Харгрейвс из Принстонского университета) стали утверждать, что происхождение геологических структур докембрия нельзя объяснить, если не предположить существование уже в то время крупномасштабной гидросферы.

В настоящее время имеется много аналогичных данных, которые свидетельствуют о том, что уже в докембрийскую эпоху существовала гидросфера, почти одинаковая с современной. А наличие в то время морской воды означает также и существование тогда же атмосферы, состоящей из летучих компонентов гидросферы. Это противоречит разработанной Руби схеме непрерывного роста и развития атмосферы в течение всей геологической истории Земли. Поэтому, хотя заслуги Руби как пионера в этой области изучения земной истории достаточно высоки, нельзя не отметить, что основные выводы были им сделаны в духе эмпиризма.

Для следующего шага в изучении проблем, касающихся происхождения атмосферы и гидросферы, нужно было освободиться от рассмотрения каких-то отдельно взятых фактов и перейти к количественным расчетам, основанным на конкретных наблюдательных данных. С этой точки зрения очень полезным оказался геохронологический метод при анализе изотопного состава инертных газов. Далее мы как раз и займемся обоснованием такого подхода при решении вопроса о происхождении атмосферы и гидросферы Земли.

Изотопный состав аргона

Давайте сначала познакомимся с табл. 4, в которой дано количественное соотношение между тремя изотопами аргона в современной атмосфере Земли. Количество одного из них, аргона-40, непрерывно увеличивается из-за радиоактивного распада калия-40. В современной атмосфере изотопное отношение со-

держаний аргона-40 и аргона-36 равно 295,5. Рассмотрим, какое же значение это изотопное отношение имело 4,5 миллиарда лет назад, сразу же после возникновения Солнечной системы, то есть вскоре после завершения основного процесса нуклеосинтеза (см. с. 43).

Согласно существующим представлениям об устойчивости атомных ядер, можно ожидать, что для каждого химического элемента изотопы с меньшими массовыми числами должны были образовываться в больших количествах. Из теории первичного нуклеосинтеза вытекает, что в момент завершения его реакций отношение количества аргона-40 к количеству аргона-36 составляло 10^{-4} . Таким образом, в момент возникновения Солнечной системы аргон должен был почти полностью состоять из изотопа аргон-36. То, что наблюдаемый в современной атмосфере аргон в подавляющем большинстве состоит из изотопа аргон-40, вызвано, как указал, Вейцзеккер, распадом калия-40 в недрах Земли.

Калий-40 входит в состав пород, содержащих обычный калий. В результате распада калия-40 постепенно начинает накапливаться в этих породах аргон-40. В период формирования Земли в состав ее внутренних слоев должно было войти некоторое количество инертных газов. За это время изотопный состав аргона, характерный отношением 10^{-4}

Таблица 4

Изотопный состав аргона в атмосфере

Изотопы аргона	Относительное содержание, %
Аргон-36	0,337
Аргон-38	0,063
Аргон-40	99,6

для содержаний аргона-40 и аргона-36, вряд ли успел сколько-нибудь существенно измениться за счет аргона-40, образующегося при распаде калия-40. Однако впоследствии такое начальное отношение содержаний изотопов стало быстро увеличиваться.

При этом следует отметить, что если выделение газов из недр Земли началось с самых ранних стадий ее истории (при начальном изотопном отношении аргона 10^{-4}), то современный изотопный состав аргона в атмосфере объяснить трудно (лишь предположив аномально высокое начальное содержание калия, о чем будет сказано дальше.— *Прим. ред.*). С другой стороны, если выделение газов началось совсем недавно, то это изотопное отношение очень быстро стало бы большим, намного превосходя современное атмосферное значение этой величины 295,5.

Кроме того, при расчетах необходимо рассмотреть два варианта: случай, когда выделение газов в основном происходило в ходе бурного кратковременного (взрывоподобного) процесса в какой-то из моментов истории Земли²⁸, и случай, когда выделение газов осуществлялось непрерывно. Дело в том, что значение этого изотопного отношения сильно зависит от того, в какой форме происходило выделение газов: было ли оно дискретным во времени или непрерывным. Но если оно протекало взрывоподобно, то для нас интересно, когда это произошло, а если оно было непрерывным, то с какой скоростью осуществля-

²⁸ Некоторые ученые считают, что это могло происходить в период активной бомбардировки формирующейся планеты метеоритами или, например, при расхождении Земли на ядро и мантию.— *Прим. ред.*

лось? И в этом и в другом случае важным ограничительным условием является сегодняшнее атмосферное изотопное отношение аргона 295,5.

Взрывоподобное образование атмосферы

Итак, если изотопный состав аргона в современной атмосфере определяется тем, как и когда происходило выделение газов, то и, наоборот, взяв это значение в качестве ограничительного условия, можно было бы попытаться выяснить, каким в действительности был этот процесс выделения газов из недр Земли. Однако на самом деле реализация данной идеи весьма затруднительна. Для того чтобы построить зависимость, подобную тем, которые изображены на рис. 20, необходимо знать содержания калия в земных недрах и аргона, захваченного Землей в момент ее формирования. А достоверно оценить эти содержания довольно трудно. Таким образом, хотя изотопный состав аргона в атмосфере является важным условием при изучении происхождения современной атмосферы, для выяснения конкретной формы выделения газов из земных недр требуется найти еще одно ограничительное условие.

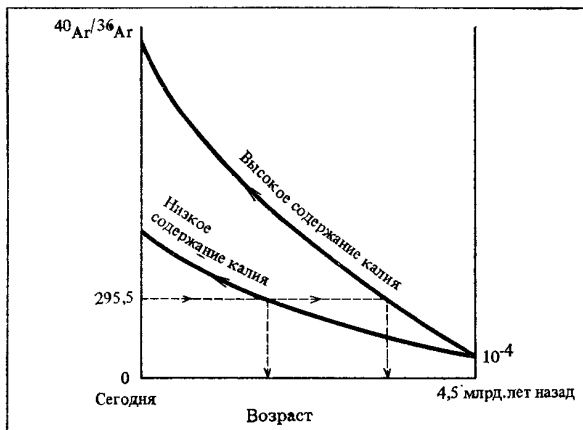
Как оказалось, для этого весьма полезно привлечь изотопный состав аргона в недрах Земли. Если помимо современного изотопного отношения аргона в атмосфере (295,5) учесть современное среднее значение изотопного отношения аргона в недрах Земли, то значительно облегчится выбор между механизмами выделения газов из земных недр.

Это легко показать, но мы лишь ограничимся сообщением окончательных результатов.

В настоящее время, согласно различным исследованиям, установлено, что внутри Земли (конкретно в ее мантии) среднее значение для отношения содержаний аргона-40 и аргона-36 близко к 5000. Расчеты показывают, что такое значение изотопного отношения можно объяснить, если только выделение газов в основном произошло в ходе очень короткого процесса на весьма ранних стадиях развития Земли (не более чем спустя 500 миллионов лет после ее образования). Кроме того, выделение газов должно было происходить очень бурно: необходимо, чтобы высвободилось около 80% аргона, захваченного Землей из протопланетного облака.

В рамках предложенной Руби схемы не-

Рис. 20. Изменение изотопного отношения аргона ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$) в зависимости от содержания калия



прерывного выделения газов разница изотопных отношений аргона в атмосфере и недрах Земли совершенно необъяснима. Иначе говоря, данные по изотопному отношению аргона указывают на то, что, хотя аргон действительно выделился из недр Земли, это произошло в ходе кратковременного процесса на очень ранних стадиях истории Земли.

Подобный же вывод можно сделать и о других составляющих (например, азоте и воде).

Чтобы в лабораторных условиях выделить аргон из горных пород, их необходимо нагреть почти до температуры плавления. Если при этом вспомнить, что процесс выделения аргона на ранних стадиях истории Земли был очень бурным и в ходе его высвободилось около 80% аргона, содержащегося в современной атмосфере, то предположение о выделении и остальных составляющих современной атмосферы в таком процессе кажется вполне реальным. Во всяком случае установленный по изотопному отношению аргона взрывоподобный характер выделения газов из недр Земли на очень ранних стадиях ее истории не противоречит данным других наук, указывающим на существование гидросферы в докембрии.

Отметим, что таким путем не мог образоваться атмосферный кислород. Как будет показано позже, этот важный продукт жизнедеятельности живых организмов мог образоваться в ходе реакций фотосинтеза, уже после того как возникла атмосфера Земли.

Инертные газы в веществе мантии

Использование изотопных отношений аргона открыло путь количественному изучению происхождения атмосферы Земли, и решающую роль здесь сыграло установление изотопного состава аргона в мантии. Надо сказать, что установить это было совсем не просто. Сначала нужно было подобрать образцы вещества, в котором с достаточно высокой степенью уверенности можно было бы предположить, что оно поднялось из мантии. Наиболее подходящими в этом смысле являются вулканические породы. Однако в случае этих пород мы не можем быть полностью уверены, что весь содержащийся в них аргон имеет мантийное происхождение.

Обычно содержание инертных газов, в том числе и аргона, в вулканических породах крайне невелико. В одном грамме вулканической породы их содержание не превышает 10^{-6} в одном кубическом сантиметре. С другой стороны, в атмосфере содержание аргона оценивается примерно в 1%. Следовательно, даже незначительная примесь воздуха может существенно изменить изотопный состав аргона в земных породах. Поэтому определить истинное изотопное отношение для аргона мантии довольно трудно.

Чтобы определить изотопный состав аргона в земных недрах, пришлось, помимо вулканических пород, исследовать и различные другие вещества мантийного происхождения. В качестве одного из них использовались алмазы. Считается, что алмазы образуются на довольно больших глубинах, по-видимому, превышающих 100 километров. Поэтому, на-

верное, не будет ошибкой предположить, что алмазы тоже имеют мантийное происхождение. И хотя некоторые ученые утверждают, что алмазы образуются на сравнительно небольших глубинах в земной коре, это не получило широкого признания.

Алмазы имеют ряд важных достоинств. Они не вступают в химические реакции ни с какими другими веществами и чрезвычайно устойчивы к высоким температурам. Поскольку кристаллы алмазов очень прочны, то газы, захваченные ими в момент образования, не ускользают наружу, а с другой стороны, можно не бояться, что в них просочится вода или проникнет воздух извне. Таким образом, если в алмазах будут содержаться инертные газы, то следует ожидать, что характерный для них изотопный состав аргона будет верно отражать изотопный состав аргона в веществе мантии.

Аргон в алмазах

При определении содержания инертных газов и изотопного состава аргона в алмазах возникает ряд трудностей еще перед началом эксперимента. Алмаз способен выдержать нагрев до очень высоких температур и чрезвычайно устойчив химически. Это указывает на то, что извлечь из него инертные газы чрезвычайно трудно. Обычно, для того чтобы выделить захваченные твердым телом инертные газы, его нагревают в вакууме до температуры, близкой к температуре плавления. Однако для алмаза этот способ не подходит, так как температура плавления алмаза при атмосферном давлении превышает

3600° С. Следовательно, чтобы расплавить алмаз, требуется вакуумная печь, способная выдержать температуру свыше 3600° С, и никакого другого материала для такой печи нет, кроме самого алмаза!

Правда, если алмаз, представляющий собой кристаллический углерод, накалишь и сжечь в кислороде, то уловить содержащиеся в нем инертные газы не составляет труда. Однако количество инертных газов, содержащихся в алмазе, крайне ничтожно. Одни грамм алмазов содержит не более одной миллиардной доли грамма аргона. В самом чистом кислороде содержание аргона на порядок выше, чем в алмазах. Следовательно, выделение аргона из алмазов можно проводить только в сверхвысоком вакууме (при давлении менее одной триллионной атмосферы).

И вот, положив перед собой полученные, наконец, 10 каратов алмазов, предназначавшихся для эксперимента, мы стали прикидывать возможные варианты. Хотя эти алмазы были техническими, среди них находилось и несколько прекрасных зерен, которые могли бы быть использованы как драгоценные камни. Любуясь этими великолепными кристаллами, мы терзались мыслью, что для выделения инертных газов из алмазов нет другого пути, кроме как их расплавить.

При высоких давлениях углерод образует кристаллы алмаза, принадлежащие к кубической группе (сингонии), но при более низких давлениях более устойчивыми являются кристаллы графита. У алмаза по сравнению с графитом более мелкие кристаллы и выше плотность (3,57 грамма в кубическом сантиметре у алмаза и 2,56 грамма в кубическом

сантиметре у графита). Следовательно, можно ожидать, что при превращении алмаза в графит, сопровождающемся более чем 20%-ным уменьшением удельного веса, произойдет «разуплотнение» кристаллической структуры алмаза. Но выделятся ли при этом инертные газы, прочно удерживаемые кристаллической решеткой алмаза?

И мы решили, вместо того чтобы расплавлять алмаз, подвергнуть его графитизации, то есть превращению в графит. Хорошо известно, что алмаз превращается в графит, если его нагреть до температуры более 1300°C при давлении в одну атмосферу. Ведь все знают, что алмазы гибнут при пожарах, превращаясь в графит. Однако цель нашего эксперимента заключалась в выделении инертных газов, и графитизация должна производиться при сверхвысоком вакууме.

Сначала было решено узнать что-либо о превращении алмазов в графит при вакууме из специальной литературы. Однако, к большому нашему удивлению, удалось обнаружить только отдельные разрозненные выводы у различных авторов, а чего-нибудь более или менее достоверного вообще не попало на глаза. Например, один автор писал, что при нагревании в вакууме, когда температура превысила 1700°C , алмаз почти мгновенно превратился в графит. Другой сообщал, что во время нагревания алмаза в вакууме при температуре 1800°C почти не наблюдалось признаков графитизации.

Но 1700°C — очень деликатная температура. Создать ультравакуумную печь для нагрева до 1700°C не представляет труда, тогда как построить подобную печь для темпера-

тур выше 1800°C технически очень сложно, и ее изготовить мы не смогли бы сразу. Таким образом, в зависимости от того, какому результату о температуре графитизации доверять, план эксперимента коренным образом менялся.

Поскольку так или иначе у нас не оставалось другого выхода, как удостовериться во всем самим, было решено провести тестовое исследование с частью опытного материала, используя имевшуюся у нас печь, создававшую довольно высокий вакуум. Сначала мы попробовали очень осторожно довести температуру до 1700°C . Зернышко алмаза, сверкавшее и искрившееся перед опытом, совершенно почернело после нагревания. Было такое впечатление, что оно полностью превратилось в графит. Однако результаты проведенного для верности рентгенодифрактометрического исследования показали, что кристалл лишь выглядел графитизированным, так как на него напылился молибден, из которого была сделана печь, а сам алмаз совершенно не изменился. Стало очевидно, что нагревания в вакууме до температуры 1700°C все-таки недостаточно для графитизации.

После обсуждения создавшегося положения было решено попробовать достигнуть максимальной температуры, которую способна выдержать имевшаяся у нас вакуумная печь. Пересчитав оставшиеся зерна, мы заперли их в несгораемый шкаф. Однако, когда подошло время проводить эксперимент, у нас не хватило духу для его осуществления. Мысль о том, что наши алмазы, весьма вероятно, могут стать ничем без всякой пользы для науки, сковывала нас. К счастью, присоединив-

шийся к нам Норрио Такаока как раз в это время сконструировал на факультете естественных наук Осацкого университета вакуумную печь, превосходно подходившую для нашего эксперимента.

Против ожиданий, эксперимент оказался легким. Когда температура превысила 2000°C , алмаз как-то очень просто превратился в графит. Как и предполагалось, инертные газы почти полностью выделились во время графитизации при 2000°C , а когда температура еще более повысилась, признаков выделения сколько-нибудь значительного количества газов обнаружить не удалось. Благодаря масс-спектрометру, непосредственно соединенному с вакуумной печью, удалось измерить количество инертных газов, заключенных в алмазе, а также изотопный состав содержавшегося среди них аргона.

Однако с публикацией полученных данных мы не торопились. Как известно, несколько международных синдикатов прочно держат в своих руках рынки сбыта алмазов. Место, где были добыты алмазы, держится в секрете, и покупателю оно неизвестно. При установлении соглашения о цене покупателю разрешают осмотреть только одно зерно из всей партии. Поэтому мы тоже ничего не знали о месте, где были найдены алмазы, послужившие образцом для опыта. Не исключена была и возможность того, что это смесь камней из разных месторождений. Хотя алмазы, скорее всего, образуются в мантии, из-за горизонтальной неоднородности ее состава интерпретация результатов эксперимента становится ненадежной, если место, где отобраны алмазы, неизвестно.

К счастью, о наших затруднениях узнали в Южноафриканском институте алмазов и предложили нам алмазы с точным «адресом» места, где они найдены.

Изотопные отношения инертных газов, в частности гелия и аргона, в алмазах оказались сильно отличающимися от атмосферных значений. В то же время они близки к значениям, характерным для вулканических горных пород. При анализе инертных газов и в вулканических породах и в алмазах отношение содержания аргона-40 к содержанию аргона-36 превышало 5000. Из этого следует, что выделение основной массы атмосферного аргона (более 80%) должно было произойти в самом начале истории Земли, вероятно, в течение первых 500 миллионов лет. Оставшиеся 20%, видимо, выделились впоследствии в результате вулканической деятельности (и это, по-видимому, относится и к другим составляющим атмосферы).

Итак, основываясь на изотопном составе аргона, стало возможным получить количественные характеристики времени и способа выделения газов атмосферы из земных недр. Если процесс выделения газов был взрывоподобным, он должен был бы охватывать всю планету. С каким конкретным событием в истории Земли это могло бы быть связано? Дать ясный ответ на этот вопрос мы сегодня не в состоянии. С наиболее высокой вероятностью таким событием, охватившим всю Землю и сопровождавшимся крупномасштабным выделением газов, мог быть процесс расслоения Земли на ядро и мантию. Однако в настоящее время это утверждение не выходит за рамки гипотезы.

Возникновение жизни и атмосфера

Приведенные здесь данные, основывающиеся на геохронологическом подходе, свидетельствуют в пользу того, что атмосфера и гидросфера Земли достигли состояния, близкого к современному, уже на ранних стадиях существования нашей планеты. Однако, думается, состав атмосферы того времени все же довольно существенно отличался от современного. И действительно, ведь одну четвертую часть атмосферы сегодня занимает кислород, образующийся в процессе жизнедеятельности организмов. А могла ли атмосфера, образовавшаяся за счет выделения газов из земных недр, иметь такой состав?

Различные предположения о составе атмосферы ранних стадий земной истории (до возникновения жизни) уже довольно давно выдвигались биохимиками, изучающими вопросы происхождения жизни. Одно из наиболее выдающихся исследований по этому вопросу принадлежит работавшему в то время в Чикагском университете лауреату Нобелевской премии Х. Юри. Он и его ученик С. Миллер, исследуя факторы, способствовавшие возникновению жизни на Земле ²⁹, пытались полу-

²⁹ В свое время результаты этого эксперимента произвели большое впечатление («открыт механизм возникновения жизни на Земле!»). Правда, сейчас результаты опыта Юри—Миллера оцениваются иначе. Этот опыт доказывал лишь физико-химическую возможность превращения неорганического вещества в органическое (аминнокислоты, сахара, фосфаты, основания и некоторые их полимеры), то есть отражал чисто внешнюю сторону гораздо более сложных процессов самоорганизации (и, конечно же, не доказывал единственную возможность такого превращения).— *Прим. ред.*

чить органические молекулы из неорганических. Они установили, что сложные органические молекулы можно синтезировать, если пропускать электрический разряд через смесь газов, состоящую из метана, аммиака и паров воды. Это был известный опыт Юри — Миллера.

В том, что Миллер и Юри выбрали в качестве материала для опыта такую, на первый взгляд, странную смесь, как аммиак, метан и пары воды, были свои причины. Ученые тогда предполагали, что ранняя атмосфера имела именно такой состав. В то время считалось, что первоначально, при возникновении Земли, ее атмосфера имела химический состав, схожий с составом протосолнечной туманности. В этой ранней атмосфере содержались водород, кислород, а также азот и углерод, которые, вступая в реакции между собой, образовывали устойчивые химические соединения. Какие конкретно химические соединения возникали при этом, зависело от температуры такой начальной атмосферы.

Миллер и Юри, разделяя общее в то время мнение о том, что аккумуляция вещества Земли происходила при сравнительно низкой температуре, в качестве температуры ранней атмосферы приняли комнатную (25°C). Если исходить из этой температуры, то с помощью термодинамических расчетов можно получить состав начальной атмосферы, состоящей из метана, аммиака, паров воды.

Во время гроз, происходящих в такой атмосфере, благодаря электрическим разрядам могло образоваться сложное органическое

вещество. В результате постепенной эволюции, согласно предположению Юри — Миллера, из него образовались первые простейшие организмы. Однако сама идея о метано-аммиачно-водяной первоначальной атмосфере Земли сталкивается с некоторыми затруднениями.

Проблема состава ранней атмосферы

Во-первых, вызывает сомнение предположение Юри — Миллера о том, что химический состав ранней атмосферы был близок к составу протосолнечной туманности. Ранее приводились данные о том, что атмосфера Земли могла образоваться из газов, выделившихся из недр планеты. Химический состав этих газов должен был отличаться от состава протосолнечной туманности. Например, во время аккумуляции вещества Земли из протосолнечной туманности инертные газы должны были захватываться в относительно меньших количествах. Действительно, как уже говорилось, по сравнению со средним химическим составом Солнечной системы содержание инертных газов в атмосфере Земли крайне ничтожно.

Во-вторых, Юри и Миллер в качестве температуры, определявшей формирование химических соединений в начальной атмосфере, предполагали комнатную температуру. Однако если атмосфера выделилась из недр, температура, соответствующая началу выделения газов, вероятно, равнялась 1000°C и более.

Если же попытаться определить состав атмосферы, выделившейся из внутренних

недр Земли при этой температуре, из расчетов получится, что она должна состоять из углекислого газа, азота и паров воды. С другой стороны, такая атмосфера не позволяет получить органическое вещество с помощью электрических разрядов³⁰.

В настоящее время с целью решения этой проблемы выдвинуто несколько альтернативных гипотез. Обращает на себя внимание предположение об особом состоянии земной поверхности на ранних стадиях существования Земли. Это состояние было похоже на современный лунный грунт (представляющий собой мельчайшие обломки пород), слагающий поверхностный слой Луны. Как полагают сторонники этой гипотезы, в период завершения формирования Земли (более 4 миллиардов лет назад) ее атмосфера была очень тонкой. А поскольку она была очень разреженной, солнечный ветер и ультрафиолетовое излучение, по-видимому, почти беспре-

³⁰ Оба этих возражения М. Озимы не столь уж весомы. Во-первых, возникновение атмосферы в результате выделения газов из недр Земли нельзя считать абсолютно доказанным. Ряд ученых, в частности, продолжают придерживаться мнения, что у Земли в период ее формирования уже существовала атмосфера, в которой самыми распространенными элементами были водород, кислород, углерод и азот. Во-вторых, хотя газы и выделялись из глубинных пород при температурах 1000—1500°C, однако температура земной поверхности вряд ли когда-нибудь сильно отличалась от современного значения.

Но, конечно же, если Земля и имела атмосферу с химическим составом, близким к составу протосолнечной туманности, то взрывоподобное выделение газов из земных недр (в чем сейчас мало кто сомневается) должно было бы сильно изменить ее первоначальный состав, а это, естественно, не учитывалось Юри и Миллером. — *Прим. ред.*

пятственно могли достигать земной поверхности. В результате поверхностные породы Земли разрушались, образуя мельчайшие частицы (земной реголит).

Однако решающим моментом являлось то, что тогда у Земли в отличие от Луны уже существовала атмосфера, хотя и довольно разреженная. Эта атмосфера, по-видимому, в основном состояла из углекислого газа, воды и азота, которые проникали в щели и трещины зерен реголита. Попадающие в поры и трещины молекулы воды и углекислого газа плотно прилегали к стенкам трещин. И за счет того, что при этом увеличивалась площадь контакта реагирующих веществ, вероятность возникновения химических реакций увеличивалась. Воздействие солнечного ветра и ультрафиолетового излучения, легко проходящих сквозь разреженную атмосферу, еще более форсировали химические реакции. В таких условиях стало возможным возникновение сложных органических соединений в атмосфере.

Высказывается и еще одно предположение, сторонники которого пытаются найти источник происхождения жизни за пределами Земли³¹. По их мнению, жизнь, зародившаяся на других планетах, затем каким-то путем была

³¹ «Теория» перенесения жизни с других планет была выдвинута, еще когда не было установлено, что Земля в этом смысле представляет собой уникальное явление в Солнечной системе. Но главное, подобные «теории» не приемлемы для действительного понимания существа проблемы, поскольку ее решение, по словам академика А. А. Имшенецкого, лишь переио-сится с Земли на другую планету и даже не делается попытка поставить вопрос о том, как вообще появилась жизнь.— *Прим. ред.*

перенесена на Землю. Однако в этом случае необходимо объяснить, как она сумела защититься от жесткого излучения в Солнечной системе.

Кроме того, существует предположение о том, что в начальной атмосфере, кроме двуокиси углерода, локально существовала окись углерода. Дело в том, что в смеси из окиси углерода, азота и воды образование органических соединений под действием электрических разрядов уже не является невозможным.

Однако представляется, что в любом случае до окончательного решения проблемы еще далеко. И уже сейчас ясно, что это не по силам решить наукам о Земле и биологии самостоятельно, то есть оставаясь только в своих границах. При рассмотрении истории Земли возникновение на ней жизни является важным ограничительным условием. С другой стороны, при изучении проблемы происхождения жизни невозможно игнорировать условия, существовавшие тогда на Земле, ставшей домом, где обитает все живое.

Проблема кислорода

Появление кислорода на Земле является наиболее фундаментальным ограничительным условием при рассмотрении вопросов, связанных с происхождением жизни. Как специалистами в области наук о Земле, так и биологами выдвигались различные предположения по этому поводу. Давайте познакомимся с обнаружением Престоном Клаудом связи между залежами полосчатых руд железа и существованием кислорода в ранней

атмосфере Земли. Обратив внимание на полосчатые руды железа (рис. 21), один из видов осадочных пород, характерных только для докембрия, Клауд привел доводы в пользу того, что их образование связано с наличием кислорода в докембрийской атмосфере Земли.

Полосчатые руды железа состоят из чередующихся слоев, образованных главным образом микрокристаллами кварца и окислами железа (гематитами). Руды железа столь примечательного минерального состава встречаются лишь в залежах, возраст которых не позже кембрия. Залежи полосчатых руд железа встречаются среди самых древних пластов (образовавшихся около 3,7 миллиарда лет назад), найденных на западном побережье Гренландии. Таким образом, допустимо предположить, что существование залежей, подобных полосчатым рудам железа, отражает характерную для докембрия обстановку осадконакопления.

Из факта существования полосчатых руд железа Клауд сделал заключение о том, что в докембрийской атмосфере Земли должен был присутствовать кислород. Ведь для отложения окисла железа необходимо, чтобы в морской воде была достаточно высока концентрация кислорода. Если бы эта концентрация была бы недостаточно высокой, железо растворялось бы в воде и отложение его стало бы невозможным. С другой стороны, наличие полосчатости в докембрийских рудах железа указывает на то, что в те времена концентрация кислорода в морской воде периодически очень сильно менялась. В некоторые моменты она была достаточно

высокой и начиналось отложение окислов железа, но затем вновь снижалась так, что их отложение прекращалось.

Таким образом, полосчатые руды железа свидетельствуют о том, что в среднем докембрии (около 1,5—2,0 миллиардов лет назад), когда в основном отлагались эти руды, в земной атмосфере, видимо, еще не накопилось достаточно большого количества кислорода, содержание которого периодически изменялось в очень широких пределах. Правда, колебания содержания кислорода в атмосфере могли и не быть причиной изменений концентрации кислорода в морской воде. Можно, например, в качестве такой причины рас-

Рис. 21. Пример полосчатой руды железа (темные слои — окислы железа, светлые — микрокристаллы кварца)



смаатривать выделение кислорода в процессе фотосинтеза появившимися в морской воде водорослями.

Изучение изотопных отношений углерода из докембрийских карбонатов, как утверждают исследователи, как раз и позволяет проследить присутствие кислорода в морской воде достаточно далеко в глубь докембрия.

Выделение кислорода при фотосинтезе

В настоящее время существование кислорода в атмосфере обычно связывают с процессом фотосинтеза зеленых растений. Хотя рассматривались и другие возможные механизмы (как, например, выделение кислорода при расщеплении молекул паров воды под действием ультрафиолетового излучения), их интенсивность оказалась недостаточной, чтобы объяснить наблюдаемое сейчас высокое содержание кислорода в атмосфере Земли. Низкое содержание молекул кислорода в атмосфере Марса еще раз подтвердило, что органические процессы, связанные с жизнедеятельностью организмов, существенно влияют на присутствие кислорода в атмосфере.

Количество кислорода в докембрийской атмосфере Земли можно поэтому оценить по следам жизнедеятельности живых организмов. Исходя из этих позиций, немецкий ученый Сидоровски попытался решить проблему атмосферного кислорода, используя изотопное отношение углерода. Природный углерод представлен двумя стабильными изотопами — углеродом-12 (99%) и углеродом-13 (1%).

Их отношение в зависимости от обстановки может изменяться на несколько процентов. Причем в углероде неорганического происхождения по сравнению с углеродом из живых организмов имеется большая доля углерода-13.

Проявляемая довольно отчетливо эта разница позволяет по изотопному составу углерода заключить, имеет ли он органическое или неорганическое происхождение. Это же касается процесса фотосинтеза. Поглощая углекислый газ, живые организмы с помощью солнечного света вырабатывают органические соединения, выделяя кислород. Если учесть только превращение элементов, то этот процесс можно описать так: атом углерода неорганического происхождения, попадая внутрь организма, превращается в органический углерод, выделяя наружу одну молекулу кислорода. Тогда одному атому углерода органического вещества соответствует одна молекула кислорода.

Поскольку органический углерод характеризуется изотопным составом, обогащенным углеродом-12, его существование можно оценить вполне достоверно. Основываясь на этом, Сидоровски решил оценить изотопное отношение углерода, входящего в состав докембрийских осадочных пород. Сопоставление результатов анализа, полученных различными исследовательскими группами и относящихся к образцам пород, собранных по всему свету (их число достигало 53), показало, что все образцы пород четко делятся на две большие группы относительно содержания углерода-13 — с большим содержанием (неорганическое происхождение) и с малым

содержанием (органическое происхождение).

Это разделение не связано с возрастом пород. Данные, относящиеся к возрасту 3,5 миллиарда лет назад, как и данные, относящиеся к возрасту 1 миллиард лет назад, одинаково отчетливо разделяются на две группы относительно содержания углерода как органического, так и неорганического происхождения. Таким образом, существование органического углерода и, следовательно, живых организмов можно считать достаточно достоверным для периода докембрийской эпохи, относящегося ко времени 3,5 миллиарда лет назад.

Если теперь допустить, что имевшиеся тогда организмы выделяли кислород при фотосинтезе, то некоторое количество кислорода впервые могло появиться в атмосфере еще 3,5 миллиарда лет назад. Однако высказываются суждения, что организмы древнего докембрия (3 миллиарда лет назад) не выделяли кислорода, и поэтому теория Сидоровски нуждается в дополнительных исследованиях. Что же касается эпохи, начинающейся со среднего докембрия, о ней можно без риска сказать, что в то время уже существовал кислород, образовавшийся при фотосинтезе растений.

ГЛАВА VIII

СВЯЗЬ ПРОШЛОГО С НАСТОЯЩИМ И БУДУЩИМ НАШЕЙ ПЛАНЕТЫ

Проблема изучения истории Земли

На протяжении предыдущих глав мы пытались проследить простирающуюся более чем на 4,5 миллиарда лет в прошлое историю Земли. На протяжении этого долгого срока происходила непрерывная эволюция Земли, движущей силой которой была энергия распада ядер радиоактивных элементов, содержащихся в ничтожных количествах в горных породах. Этими радиоактивными элементами являются уран, торий, калий-40 и т. п. Все они имеют длительный период полураспада — от нескольких сот миллионов до нескольких миллиардов лет. Однако каким бы длинным ни был период полураспада этих элементов, их существование все же не беспредельно, и рано или поздно все содержащиеся в недрах Земли радиоактивные элементы распадутся и иссякнет рассматриваемая здесь движущая сила в развитии Земли.

Если рассматривать историю Земли в большом масштабе, можно сказать, что история и эволюция Земли протекали параллельно именно ритму периода полураспада урана, калия-40 и других радиоактивных элементов. То, что эволюция Земли протекает в очень медленном темпе, — факт, делающий исследования в науках о Земле уникальными. Конечно, явления земной истории не выходят за рамки физических законов. Однако обычные физические явления протекают в преде-

лах времени человеческой жизни, и мы имеем возможность повторно наблюдать и изучать эти явления. Именно возможность повторно воспроизводить изучаемое явление служит основой лабораторных исследований. Если же рассматривать события истории Земли, то, поскольку наша жизнь крайне коротка по сравнению с периодом полураспада урана и калия-40, воспроизводимость явлений совершенно исключается.

При изучении истории Земли в отличие от рассмотрения физических и химических явлений исследования проводятся на основе анализа окаменелостей, оставленных геологическими явлениями. Как мы знаем, в качестве таких «окаменелостей» эффективно могут использоваться зафиксированные в горных породах, атмосфере и гидросфере изотопные отношения элементов. Важным источником информации о возникновении Земли стали метеориты, также являющиеся своего рода окаменелостями, в которых «заморожено» состояние начальных стадий существования Солнечной системы. В качестве «окаменелостей» геомагнитного поля Земли прошлых лет может применяться остаточная намагниченность горных пород.

Методы исследований

При развитии исследований в области наук о Земле, изучающих чрезвычайно продолжительные и никогда дважды неповторяющиеся явления прошлого Земли, помимо сравнительно простых физико-математических и химических методов, потребовалось создание и своих собственных. Давайте еще раз

вернемся к проблеме дрейфа континентов, который сейчас принимается многими учеными, но, правда, не всеми. Однако если бы удалось более непосредственно установить вид дрейфа континентов, то вряд ли кто стал оспаривать их движение в прошлом.

Если разделение Африки и Южной Америки началось около 200 миллионов лет назад, то с учетом сегодняшней ширины Атлантического океана, 7000 километров, скорость движения континентов составит около 3,5 сантиметра в год. За 10 лет дрейф осуществляется примерно на 40 сантиметров. При дальнейшем прогрессе лазерной техники вполне станет возможным обнаружить изменение расстояния такого порядка.

Можно попытаться измерить очень малое изменение расстояния между материками с помощью теодолитной съемки, поместив вершину треугольной измерительной сети на Луну. К сожалению, поскольку вариации расстояния между Луной и Землей известны недостаточно полно, осуществить этот проект, по-видимому, не удастся. И хотя неоднократно предпринимались попытки осуществить подобный эксперимент в пределах Земли, все они заканчивались неудачным исходом.

Что касается экспериментального доказательства дрейфа континентов, дело здесь не ограничивается техническими трудностями, имеются, как мне кажется, и более глубокие причины. Они как раз связаны с необходимостью выйти за рамки физических и химических методов и разработать собственные методы в области изучения истории Земли.

Мы установили, что среднегодовое смеще-

ние при дрейфе континентов составляет несколько сантиметров, разделив ширину Атлантического океана на время, в течение которого происходил дрейф континентов. Иначе говоря, мы исходили из предположения, что за 200 миллионов лет материки переместились на 7000 километров. Естественно, материки не могли мгновенно совершить прыжок на 7000 километров, и поэтому наш способ получения средней скорости имеет смысл. Однако делать из этого вывод, что континенты, непрерывно двигаясь, каждый год проходят по 3,5 сантиметра, было бы опрометчиво.

И действительно, дрейфующие континенты скорее всего движутся неравномерно. Иногда за очень короткие сроки они могут перемещаться на большие расстояния (в том числе в ряде случаев в обратном направлении), а иногда в течение весьма длительного времени совершенно не двигаться. Поэтому наблюдения, проведенные за ограниченные короткие промежутки времени, могут дать совершенно неверный результат. И чтобы достоверно установить хотя бы истинное направление движения континентов, потребуются данные, соответствующие масштабу времени от нескольких десятков тысяч до нескольких сотен тысяч лет.

Средняя же скорость дрейфа континентов станет иметь смысл только при исследованиях в масштабе нескольких миллионов лет. Таким образом, дрейф континентов вряд ли является подходящим объектом для обычных физических исследований. Приведенный здесь пример лишний раз показывает, что при изучении явлений, характеризующихся в

масштабах времени земной истории, необходимо в качестве средств этого изучения основываться на явлениях соизмеримого временного масштаба (тоже относящихся к истории Земли).

Методологические аспекты изучения истории Земли

Хотя рассматриваемые события в истории Земли сами по себе являются очень интересной темой исследований, они, кроме того, могут стать основой для разработки и мощного средства познания современного состояния нашей планеты. В качестве примера можно привести проблему магнитного поля Земли. Считают, что существующие в жидком ядре движения создают земное магнитное поле, действуя подобно токам в статорной обмотке при запуске электрогенератора. Теория происхождения земного магнетизма объясняет, какую форму имеют движения в жидком ядре и как с их помощью непрерывно поддерживается магнитное поле Земли. Однако если основываться только на современных наблюдениях, теория происхождения земного магнитного поля будет неполной, поскольку не учитывает инверсии магнитного поля Земли, являющиеся наиболее фундаментальной его особенностью.

Инверсии магнитного поля Земли можно обнаружить, только исследуя периоды истории Земли с временным масштабом в несколько десятков миллионов лет. С другой стороны, теория происхождения магнитного поля Земли не может быть полной, если она не рассматривает такие продолжительные дви-

жения вещества в жидком ядре, способствующие возникновению инверсий геомагнитного поля. Поэтому явления, подобные земному магнетизму, для лучшего понимания требуется рассматривать в масштабе времени от нескольких десятков миллионов до нескольких сотен миллионов лет.

Случай с примером земного магнетизма не единственный. Характерной особенностью магнитных объектов исследования в науках о Земле является то, что для полного понимания следует их рассматривать в процессе всей эволюции Земли. Однако эта особенность исследований в области наук о Земле не является всеобщей. Например, для определения кристаллической структуры минералов не требуется понимания процессов всей земной эволюции, а достаточно осуществлять пространственные измерения.

Изучение истории Земли не только способствует лучшему пониманию сегодняшнего состояния нашей планеты. Подобного рода исследования также дают нам и наиболее могущественное средство для предсказания будущего Земли. Конечно, прогнозы, которые можно здесь давать, относятся лишь к довольно отдаленной перспективе, порядка нескольких десятков миллионов лет, а для предсказания очень близкого будущего они не годятся. Так, например, изучение истории Земли пока не может достоверно ответить на вопрос, случится ли вскоре в каком-нибудь конкретном месте крупное землетрясение.

Однако и знание будущего развития Земли на ближайшие несколько десятков миллионов лет не только является объектом простого познавательного любопытства, но в дей-

ствительности может иметь самое непосредственное отношение к нашей повседневной жизни. Далее в качестве подобного примера рассмотрим проблему захоронения радиоактивных отходов.

Проблема захоронения радиоактивных отходов

Со времени нефтяного кризиса 1973 года вопрос об источниках энергии завтрашнего дня почти ежедневно обсуждается в газетах и по телевидению. То, что запасы нефти ограничены, является совершенно очевидным, и все согласны с необходимостью быстрее перехода к использованию альтернативных источников энергии. В качестве одного из самых многообещающих таких источников является ядерная энергия. Однако непрерывно вырабатываемые ядерными реакторами на атомных электростанциях радиоактивные отходы очень остро ставят проблему устранения их воздействия на окружающую среду. Эта задача непременно должна быть как-то решена, если мы хотим разрешить энергетическую проблему за счет ядерной энергии.

Возможны три способа захоронения радиоактивных отходов. Первый из них заключается в том, что радиоактивное вещество очень сильно «разбавляют» и возвращают в природу, захороняя в водах морей и океанов, где оно рассеивается за счет диффузии. Например, в западноевропейских странах сегодня вещество с низким уровнем радиоактивности сбрасывается в Атлантический океан. Однако этот способ сопряжен с большим риском.

С течением времени под действием химических и биологических процессов в местах сброса могут образовываться локальные повышения концентрации радиоактивных веществ. В нашей памяти еще свежа трагедия появления болезни Минамата³², вызванная тем, что рассеянная в морской воде ртуть промышленных стоков стала накапливаться в организмах рыб и моллюсков.

Вторая возможность заключается в хранении радиоактивных отходов под постоянным строгим наблюдением (например, в хранилищах, находящихся под контролем правительственных организаций). Однако среди радиоактивных веществ есть и с периодом полураспада, превышающим десятки тысяч и миллионы лет. Следовательно, и мероприятия по обеспечению безопасности такого хранения должны быть рассчитаны на десятки миллионов лет. Между тем очевидно, что осуществление такого контроля даже в течение тысяч лет уже выглядит довольно несерьезно.

Последний и, видимо, единственно реальный метод — это захоронять радиоактивные вещества в отдаленных местах планеты, где исключен их контакт с человеком. Если рассматривать радиоактивные вещества с периодом полураспада в несколько десятков тысяч — несколько миллионов лет, надежными могут считаться меры безопасности, гарантирующие изоляцию этих веществ в течение нескольких миллионов — нескольких сот миллионов лет.

³² Вспышка этой болезни была зарегистрирована в середине 50-х годов в маленьком городке Минамата на юге Японии.

Появляются проекты типа того, чтобы собрать радиоактивные отходы и запустить их на ракете в сторону Солнца. Однако если принять во внимание расходы, связанные с осуществлением такого проекта, а также опасность, связанную с тем, что абсолютно нельзя исключить падение ракеты на Землю вследствие неисправности, то реальность осуществления этого варианта весьма сомнительна.

Спокойное глубоководное дно

Сопоставление всех этих методов с очевидностью указывает, что наиболее реальным из них на сегодня является захоронение радиоактивных отходов в герметичных контейнерах на глубоководном океаническом дне.

Проведенные измерения показывают, что скорость течений в глубоководных областях очень мала. Ничтожна и вероятность того, что погружившиеся в глубоководный ил контейнеры с радиоактивным веществом будут разрушены или начнут дрейфовать под действием течений или волнений морской воды.

Установлено также, что сфера деятельности животных, обитающих на этих глубинах, ограничена пределами океанического дна и они практически не вступают в контакт с рыбами и моллюсками, обитающими в остальных районах морей и океанов. И если, несмотря на все предосторожности, эта глубоководная фауна все же подвергнется радиоактивному заражению, возможность попасть в сферу жизнедеятельности человека для нее почти исключена.

Таким образом, глубоководное дно, можно сказать, с многих точек зрения является наиболее удаленным от сферы жизнедеятельности человечества и экономически достижимым местом на Земле.

В каком же месте глубоководного дна лучше всего захоронять радиоактивные отходы?

Оно должно оставаться стабильным во временном масштабе, соответствующем периоду полураспада захороняемого радиоактивного вещества. Одним из наиболее опасных для человека радиоактивных веществ, вырабатываемых в реакторах, является изотоп плутония, имеющий период полураспада 400 тысяч лет. Для того чтобы радиоактивное вещество стало безопасным, необходимо, чтобы прошло время, по крайней мере в 100 раз превышающее его период полураспада. Следовательно, чтобы захоронять радиоактивные отходы, нужно найти на глубоководном океаническом дне участки, которые оставались бы структурно устойчивыми на протяжении десятков миллионов лет.

В этом смысле очень полезными, если не единственно пригодными становятся исследования истории Земли.

Еще раз о структуре океанического дна

Вспомним основные типы структурных образований океанического дна. Поднимающееся в виде магмы мантийное вещество выходит на поверхность в срединно-океанических хребтах и, растекаясь в разные стороны от них, образует океаническое дно. Срединно-океанические хребты являются очень

активными зонами и поэтому мало подходят для захоронения радиоактивных веществ. В частности, вследствие интенсивной наблюдающейся там вулканической деятельности велика и опасность того, что контейнеры будут разрушены и радиоактивные отходы попадут в морскую воду.

Появившееся на поверхности в срединно-океанических хребтах океаническое дно начинает последовательно растекаться в обе стороны от них. Скорость такого процесса очень мала, не превышает нескольких сантиметров в год. Если ограничиться Тихим океаном, то там океаническое дно, возникшее в Восточно-Тихоокеанском поднятии, передвигаясь в течение 150 миллионов лет на северо-запад, должно достигнуть, наконец, Японского или других близких глубоководных желобов и там вторично погрузиться в мантию.

Если радиоактивные отходы сбросить в глубоководный желоб, то, казалось бы, они должны вместе с океаническим дном погрузиться навсегда в мантию. Такая идея была опубликована в журнале «Нэйчур». Однако, как стало ясно в результате последних исследований, структура глубоководных желобов является не такой уж простой, как думали раньше. В частности, предсказывается возможность того, что при погружении океанического дна в мантию осадочные породы, расположенные на поверхности океанической плиты, благодаря упору в верхнюю часть глубоководного желоба могут выдавливаться на континентальную плиту. Если это так, то радиоактивные вещества, направляемые таким путем в мантию, могут вместо этого достигнуть Японских островов.

Кроме того, как недавно установили исследования, часть глубоководных желобов оказалась неожиданно активной в структурном отношении. Осенью 1977 года в ходе работ, являвшихся частью международного проекта глубоководного бурения ИПОД, при исследованиях Японского желоба на северной широте 40° всего в нескольких десятках километров от желоба был обнаружен довольно крупный массив древней суши (древняя суша Оясио). Оказалось, что часть этой суши сложена вулканическими породами неожиданно молодого возраста (22 миллиона лет назад). Погружение в Японский желоб началось, как полагают, более 400 миллионов лет назад. То, что часть глубоководного желоба сложена такими молодыми вулканическими породами, тогда как для захоронения радиоактивных отходов требуются стабильные условия в течение по крайней мере 100 миллионов лет, заставляет признать их неподходящими для этих целей.

Глубоководное дно в центре Тихого океана

Если обобщить все сказанное раньше, то следует признать, что единственным местом, где можно ожидать стабильного тектонического режима земной коры во временных масштабах порядка 100 миллионов лет, является простирающееся между срединно-океаническими хребтами и глубоководными желобами так называемое собственно океаническое дно. Но как можно убедиться в том, что оно действительно остается стабильным на протяжении 100 миллионов лет?

Одна из попыток ответа на этот вопрос связана с исследованиями американских ученых из океанографического института В. Хойла. Выбрав в качестве возможного стабильного участка дна район, расположенный примерно в 1000 километрах к северу от Гавайских островов ($31,5^\circ$ северной широты и 158° западной долготы), они провели его подробное исследование. В этом районе верхние 20—40 метров разреза занимает глубоководный ил. Используя для его отбора специальное устройство (так называемый поршневой пробоотборник), ученым удалось поднять колонку этого ила.

На основании анализа окаменелостей ими было установлено, что самая верхняя часть колонки сложена современными породами, а самая нижняя — позднемеловыми (около 65 миллионов лет назад). Подробное палеонтологическое исследование показало, что за весь этот период не было перерыва в накоплении осадков. Это указывает на то, что на протяжении последних 60 миллионов лет в этом районе не было ничего, что могло бы повлиять на обстановку осадконакопления (например, землетрясений или извержений вулканов).

Кроме того, имеет значение тот факт, что отложение глубоководного ила на протяжении последних 60 миллионов лет происходило в одной и той же обстановке. На разных уровнях в глубоководном иле найдены окаменелости, принадлежащие к различным эпохам. При этом, разумеется, в направлении сверху вниз наблюдался систематический переход от более молодых окаменелостей ко все более древним. Следовательно, пользуясь извест-

ным возрастом окаменелостей, можно определить скорость осаднения ила в разные эпохи. Если скорость накопления осадков во время какой-либо эпохи была высокой, ей будет соответствовать сравнительно толстый слой осадков, и наоборот.

Ученые из Океанографического института Хойла установили, что в центре Тихого океана на протяжении последних 60 миллионов лет скорость накопления осадков была почти одинаковой. Этот факт доказывает, что на протяжении нескольких десятков миллионов лет глубоководное дно в центральных районах Тихого океана оставалось очень стабильным.

Каждый импульс расширения океанического дна в Тихом океане сопровождается движением океанической коры к глубоководным желобам, погружением ее в мантию или выдавливанием части ее на континентальную плиту, то есть в сторону Японских островов. Однако, для того чтобы переместиться от центра Тихого океана к Японскому желобу, если считать, что наблюдаемая сегодня средняя скорость останется постоянной, потребуется свыше нескольких десятков миллионов лет. Этот срок можно считать безопасным даже для долгоживущих радиоактивных элементов.

Основываясь на результатах своих исследований, ученые Океанографического института Хойла предложили в качестве способа захоронения радиоактивных отходов запечатывать их в герметичные контейнеры и погружать в глубоководный ил на дне центральной части Тихого океана.

Приведенный выше пример захоронения

радиоактивных отходов показывает, как данные изучения истории Земли в масштабе нескольких десятков миллионов лет могут дать конструктивное решение для самых насущных проблем сегодняшнего и завтрашнего дней. Однако, проводя исследования истории Земли, мы, ученые, хотя и получаем время от времени очень конкретные приложения наших исследований, все же в основном ищем ответы на такие наиболее фундаментальные вопросы наук о Земле, как состояние нашей планеты в эпохи, отстоящие от нас на сотни миллионов и миллиарды лет. Прогресс наук о Земле последних лет, основанный на изучении изотопных отношений химических элементов в природе, начинает понемногу проливать свет на почти неисследованное прошлое Земли в эпохи несколько сот миллионов — несколько миллиардов лет назад.

Заключение

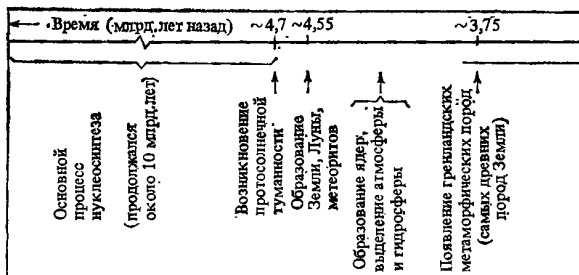
Давайте обобщим все, что мы узнали о длившейся 4,5 миллиарда лет истории Земли (рис. 22).

Как сейчас считают, Земля возникла в Солнечной системе 4,55 миллиарда лет назад. Этот возраст принят по аналогии с возрастом метеоритов, и определить его по горным породам Земли невозможно.

Химические элементы, из которых состоит Земля, образовались гораздо раньше, чем сформировалась наша планета. Они возникли в ходе реакций нуклеосинтеза, продолжавшихся свыше 10 миллиардов лет. Полагают, что большое влияние на ход этих реакций оказал произошедший вблизи будущей Солнечной системы взрыв Сверхновой звезды. Из образовавшихся элементов вскоре сформировалась протосолнечная туманность, в которой затем началась аккумуляция вещества, приведшая к возникновению Земли.

Между завершением основного процесса нуклеосинтеза элементов и формированием

Рис. 22. Схема истории Земли

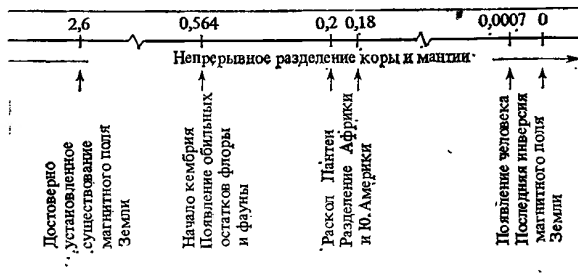


Земли прошло не более 100 миллионов лет. Это установлено из того, что в Земле в момент ее возникновения присутствовал изотоп йод-129 (на присутствие этого изотопа указывает образовавшийся из него ксенон-129).

Спустя не более чем через несколько сот миллионов лет после образования Земли, то есть свыше 4 миллиардов лет назад, сформировалось ядро и почти одновременно с этим произошло крупномасштабное выделение газов из недр Земли, за счет которого сформировалась большая часть современной атмосферы и гидросферы. Это было установлено по изотопному отношению аргона земных недр, времени возникновения магнитного поля Земли и т. п.

Как следует из изотопных отношений стронция и свинца, разделение коры и мантии происходило непрерывно на протяжении почти всей истории Земли.

Активность коры докембрия еще недостаточно для нас понятна. Может ли тектоника плит, замечательно объясняющая геологические явления, начиная с мезозоя, быть применена к докембрию — это является одним из



наиболее интересных и важных вопросов. Наиболее древние из известных нам пород земной коры образовались 3,7 миллиарда лет назад.

После палеозоя в течение сравнительно короткого срока, охватывающего 10% истории Земли, главными героями, видимо, стали дрейф континентов и расширение океанического дна. 200 миллионов лет назад бывший до этого единым блоком континент Пангея начал разделяться на части.

В океанической коре и осадочных породах можно проследить начинающуюся с палеозоя и доходящую до нашего времени почти непрерывную хронику земного магнетизма. Выяснилось, что, непрерывно меняя свое направление один раз в несколько сотен тысяч лет, магнитное поле Земли испытывает изменение полярности. Последняя инверсия земного магнитного поля имела место 700 тысяч лет назад.

Минору ОЗИМА

ИСТОРИЯ ЗЕМЛИ

Перевод с японского Н. И. Жукова

Главный отраслевой редактор Л. А. Ерлыкин

Редактор Е. Ю. Ермаков

Мл. редактор Г. И. Валюженич

Оформленне художников М. А. Дорохова,

Э. Н. Ахтырской

Худож. редактор М. А. Гусева

Техн. редактор Н. В. Лбова

Корректор С. П. Ткаченко

ИБ № 5370

Сдано в набор 26.11.82. Подписано к печати 03.06.83.
Зак. Ю-504. Формат бумаги 75×90¹/₃₂. Бумага тип. № 2.
Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л.
8,13. Усл. кр.-отт. 8,44. Уч.-изд. л. 7,56. Тираж 50 000 экз.
Заказ Р-120. Цена 35 коп. Издательство «Знание», 101835,
ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс за-
каза 837718. Типография издательства Тат. ОК КПСС,
г. Казань, ул. Декабристов, 2.